



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y REDES DE COMUNICACIÓN

TEMA: “ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE LA TECNOLOGÍA MULTIACCESS
EDGE COMPUTING (MEC) BAJO COMUNICACIÓN V2X EN REDES INALÁMBRICAS
DE QUINTA GENERACIÓN PARA LA ACTUALIZACIÓN DE RUTAS DE AUTOBUSES
DE TRANSPORTE PÚBLICO SOBRE PARADAS INTELIGENTES EN LA CIUDAD DE
IBARRA”

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
EN ELECTRÓNICA Y REDES DE COMUNICACIÓN**

AUTOR: BRAYAN ARMANDO CHANDI CISNEROS

DIRECTOR: ING. FABIÁN GEOVANNY CUZME RODRÍGUEZ, MSC.

ASESOR: ING. HERNÁN MAURICIO DOMÍNGUEZ LIMAICO, MSC.

Ibarra - Ecuador

2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DEL CONTACTO		
CÉDULA DE IDENTIDAD	100416039-4	
APELLIDOS Y NOMBRES	Chandi Cisneros Brayan Armando	
DIRECCIÓN	Urbanización Fepcomi Calles A – G #7-14	
E-MAIL	bachandic@utn.edu.ec	
TELÉFONO FIJO	-----	TELÉFONO MÓVIL 0985149134

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO	“Análisis de desempeño de la tecnología MultiAccess Edge Computing (MEC) bajo comunicación V2X en redes inalámbricas de quinta generación para la actualización de rutas de autobuses de transporte público sobre paradas inteligentes en la ciudad de Ibarra”
AUTOR	Chandi Cisneros Brayan Armando
FECHA	03 de marzo de 2023
PROGRAMA	Pregrado
TÍTULO	Ingeniero en Electrónica y Redes de Comunicación
DIRECTOR	Ing. Fabián Geovanny Cuzme Rodríguez, MSc.

CONSTANCIAS.

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 03 días del mes de marzo de 2023

EL AUTOR



Brayan Armando Chandi Cisneros

CI: 100416039-4



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN.

MAGISTER FABIÁN CUZME RODRÍGUEZ, DIRECTOR DEL PRESENTE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA:

Que, el presente trabajo de Titulación “ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE LA TECNOLOGÍA MULTIACCESS EDGE COMPUTING (MEC) BAJO COMUNICACIÓN V2X EN REDES INALÁMBRICAS DE QUINTA GENERACIÓN PARA LA ACTUALIZACIÓN DE RUTAS DE AUTOBUSES DE TRANSPORTE PÚBLICO SOBRE PARADAS INTELIGENTES EN LA CIUDAD DE IBARRA” ha sido desarrollado por el señor Brayan Armando Chandi Cisneros bajo mi supervisión.

Es todo en cuanto puedo certificar en honor de la verdad.

Ing. Fabián Geovanny Cuzme Rodríguez, MSc.

CC: 131152701-2

DIRECTOR

DEDICATORIA

A mis padres Segundo y Cecilia, quienes desde muy pequeño me supieron guiar y apoyar incondicionalmente con tenacidad en cada paso de mi vida al priorizar siempre la enseñanza y aplicación de valores y principios que conllevan al éxito, permitiéndome así llegar a estas instancias como un hombre de bien.

A mis hermanos Javier, Lady y Edison; los cuales sembraron en mi desde muy joven la labor parcial de ser un guía para su formación y su ejemplo a seguir como hermano mayor, ayudándome así a formar el carácter para tomar decisiones firmes en cada obstáculo de mi formación profesional; este triunfo es suyo por ser el soporte en cada desvelo y duda académica.

A mis ángeles de la guarda, mi abuelito Jesús, quien me brindo su cariño y apoyo en mis primeros pasos académicos como niño; y a su esposa, mi segunda madre Laura, quien estuvo presente en cada logro y fracaso desde mi escuela hasta mi universidad, siempre brindándome el amor más puro que se puede imaginar y recordándome la presencia de mi tesoro más grande, la familia.

Brayan Armando Chandi Cisneros

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Técnica del Norte por el cúmulo de saberes impartidos a través de sus docentes con alta calidad profesional.

A la Empresa Pública de Movilidad del Norte MOVIDELNOR E.P. por confiar en mi calidad humana y profesional al abrir sus puertas y permitirme conocer de forma técnica la estructuración de proyectos previos con el enfoque ciudad inteligente; lo cual permitió cimentar las bases de dicho trabajo de investigación.

Al Ing. Fabián Cuzme, MSc. y al Ing. Mauricio Domínguez, MSc. quienes con paciencia y entrega a su labor supieron de forma acertada guiarme en cada paso de la elaboración de este trabajo de titulación, más allá les agradezco por su firmeza y profesionalismo entregado en cada clase impartida en niveles de la carrera de Ingeniería en Electrónica y Redes de Comunicación; más que docentes, mentores.

A mis amigos, por ser más que compañeros de aula y enseñarme el valor de cada segundo compartido más allá de ambientes académicos.

Brayan Armando Chandi Cisneros

ÍNDICE DE CONTENIDO

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD	
TÉCNICA DEL NORTE.....	1
IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.	1
CONSTANCIAS.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
CERTIFICACIÓN.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
DEDICATORIA.....	4
AGRADECIMIENTO	5
RESUMEN.....	19
ABSTRACT.....	21
1. CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO.....	23
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	23
1.2 OBJETIVOS	25
1.2.1 Objetivo General.....	25
1.2.2 Objetivos Específicos.....	26
1.3 ALCANCE.....	26
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	28
2 CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO.....	31
2.1 REDES MÓVILES	31
2.1.1 2G y 3G.....	32
2.1.2 4G.....	37

2.1.3	5G.....	40
2.2	MULTIACCESS EDGE COMPUTING (MEC).....	43
2.2.1	Escenarios	45
2.2.2	Arquitectura	46
2.2.3	Aporte a entornos inteligentes	49
2.3	COMUNICACIÓN VEHICULAR V2X.....	49
2.3.1	Comunicaciones V2V y V2N	51
2.3.2	Arquitectura	53
2.4	CIUDADES INTELIGENTES.....	54
2.4.1	Características	55
2.4.2	Elementos clave que definen una ciudad inteligente	55
2.4.2.1	Movilidad Inteligente.....	56
2.4.2.2	Medioambiente inteligente.....	58
2.4.2.3	Gobiernos inteligentes	58
2.5	SIMULADORES UTILIZADOS PARA ENTORNOS INALÁMBRICOS	58
2.5.1	OMNET++	59
2.5.1.1	VEINS.....	61
2.5.1.2	Simu5G	62
2.5.2	SUMO.....	62
2.5.3	NS3	63
2.5.4	OPNET.....	64
2.6	TRABAJOS RELACIONADOS.....	67

3	CAPITULO III: ESTABLECIMIENTO DE REQUERIMIENTOS Y DISEÑO DEL PROYECTO.....	71
3.1	ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL	71
3.2	ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS	78
3.2.1	Stakeholders	79
3.2.2	Sistema.....	80
3.2.3	Arquitectura	82
3.3	SELECCIÓN DE SOFTWARE DE SIMULACIÓN	85
3.4	DISEÑO DE SISTEMA DE COMUNICACIÓN	87
3.4.1	Delimitación de zona de cobertura	87
3.4.2	Propuesta de infraestructura de comunicación	90
3.4.2.1	Red de Acceso.....	92
3.4.2.2	Red de Transporte	93
3.4.2.3	Core Network.....	93
3.4.2.4	Almacenamiento y Servicios	97
4	CAPÍTULO IV: IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS.....	99
4.1	IMPLEMENTACIÓN DE DISEÑO SOBRE ENTORNO DE SIMULACIÓN	99
4.1.1	Movilidad vehicular como fuente de datos.....	99
4.1.1.1	Importación de mapa georreferenciado	100
4.1.1.2	Programación de rutas.....	107
4.1.2	Integración de componentes de red sobre software	120
4.2	OPERACIÓN DEL SISTEMA.....	131
4.2.1	Proceso de ejecución de simulación y obtención de resultados.....	131

4.2.2	Análisis de resultados	139
4.2.2.1	Análisis de escenario red_Movilidad.....	143
4.2.2.2	Análisis del escenario red5G_NSA	158
4.3	DISCUSIÓN.....	178
5	CONCLUSIONES.....	179
6	RECOMENDACIONES	181
7	BIBLIOGRAFÍA.....	183
8	ANEXOS.....	194
8.1	ANEXO A: FORMATO DE ENTREVISTA REALIZADA A FUNCIONARIO/S MOVIDELNOR E.P.	194
8.2	ANEXO B: ENTREVISTA EJECUTADA A FUNCIONARIOS MOVIDELNOR E.P	195
8.3	ANEXO C: ANÁLISIS DE DOCUMENTAL DE ESTUDIOS REFERENCIALES	195
8.4	ANEXO D: SCRIPTS .NED Y .INI ESTRUCTURADOS PARA LA DEFINICIÓN DE DE RED Y OPERACIÓN CONVERGENTE DE EQUIPOS Y DISPOSITIVOS.	202

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura de comunicación GSM.....	34
Figura 2. Arquitectura de comunicación UMTS	36
Figura 3. Arquitectura de comunicación LTE	38
Figura 4. Arquitectura básica de comunicación 5G Stand Alone.....	41
Figura 5. Arquitectura 5G NSA.....	43
Figura 6. Ejemplos de despliegue de elementos sobre escenarios MEC	46
Figura 7. Arquitectura de referencia ETSI ME.....	48
Figura 8. Ejemplo de comunicación V2X	54
Figura 9. Ejemplo de transporte público urbano y parada inteligente en el paseo de Gracia – Barcelona – España.....	57
Figura 10. Módulos simples y compuestos.....	60
Figura 11. Principales módulos disponibles en paquete Simu5G.....	62
Figura 12. Ejemplo de simulación en SUMO.....	63
Figura 13. Ejemplo de simulación sobre NS-3	64
Figura 14. Ejemplo de simulación en OPNET Modeler	65
Figura 15. Topología de red de las paradas interactivas de MOVIDELNOR E.P.	74
Figura 16. Arquitectura de la infraestructura tecnológica alojada en las paradas interactivas de MOVIDELNOR E.P.....	75
Figura 17. Diagrama de bloques de etapas del sistema de comunicación	87
Figura 18. Mapa del cantón Ibarra ubicado en la provincia de Imbabura – Ecuador	88

Figura 19. Área geográfica para estudio de eficiencia de sistema de comunicación planteado con Limites: Calles Eusebio Borrero – Antonio José de Sucre – Av. Pérez Guerrero – Chica Narváez	89
Figura 20. Intensidad de tráfico vehicular dentro del área geográfica planteada	90
Figura 21. Arquitectura de red propuesta para comunicación V2X-MEC-5G (NSA)	91
Figura 22. Mapa de cobertura para las redes móviles operativas en Claro – CONECEL S.A... ..	94
Figura 23. Mapa de cobertura para las redes móviles operativas en CNT - EP	95
Figura 24. Mapa de cobertura para las redes móviles operativas en Movistar – OTECEL S.A ..	95
Figura 25. Mapa de cobertura para las redes móviles operativas en Tuenti – OTECEL S.A	96
Figura 26. Diagrama de secuencia de funcionamiento del sistema de comunicación	98
Figura 27. Identificación de zona geográfica a evaluar	100
Figura 28. Archivo .osm extraído de zona geográfica	101
Figura 29. Generación de archivo .net.xml para edición de características de movilidad.....	101
Figura 30. Verificación de archivos generados	102
Figura 31. Importación de polígonos adicionales para estructuración de características de zona geográfica.....	103
Figura 32. Creación exitosa de archivo de características físicas typemap.xml	103
Figura 33. Archivos .rou.xml y rou.alt.xml generados a partir de .net.xml para prueba de rutas sobre vías	104
Figura 34. Creación de archivo .sumo.cfg para ejecución de simulación sobre entorno gráfico sumo-gui	105
Figura 35. Área geográfica del centro de la ciudad de Ibarra en software de simulación de movilidad vehicular SUMO	106

Figura 36. Validación de archivos generados en simulación de prueba con rutas aleatorias ...	107
Figura 37. Verificación de identificadores asignados a vías del mapa ibarraCentro.net.xml...	108
Figura 38. Programación de rutas en interfaz gráfica de herramienta Netedit > Route Mode .	109
Figura 39. Programación de ruta Linea11 en SUMO	110
Figura 40. Programación de ruta Linea12 en SUMO	111
Figura 41. Programación de ruta Linea13 en SUMO	112
Figura 42. Programación de ruta Linea14 en SUMO	113
Figura 43. Programación de ruta Linea15 en SUMO	114
Figura 44. Programación de ruta Linea16 en SUMO	115
Figura 45. Programación de ruta Linea19 en SUMO	116
Figura 46. Programación de ruta Linea03 en SUMO	117
Figura 47. Programación de ruta Linea04 en SUMO	118
Figura 48. Programación de ruta Linea10 en SUMO	119
Figura 49. Archivo ibarraCentro.sumo,cfg generado	120
Figura 50. Creación de nuevo proyecto en Omnet++ v.6.0 (Linux Ubuntu 20.04 LTS). y asociación de atributos generados en SUMO v.1.8.0 (Windows 10)	121
Figura 51. Referenciación de nuevo proyecto creado.....	122
Figura 52. Red de comunicación estructurada sobre Omnet++ v.6.0.....	123
Figura 53. Atributos programados en el script .ini de Omnet++ para definición de formato de resultados de salida	124
Figura 54. Atributos programados en el script .ini de Omnet++ para definición de parámetros iniciales de simulación	125

Figura 55. Atributos programados en el script .ini de Omnet++ para convergencia de tecnologías 4G y 5G.....	126
Figura 56. Atributos programados en el script .ini de Omnet++ para operación de espectro de radio 4G y 5G.....	127
Figura 57. Atributos programados en el script .ini de Omnet++ para la definición de parámetros de asociación del grupo de usuarios UE a las estaciones base eNodeB y gNodeB	129
Figura 58. Atributos programados en el script .ini de Omnet++ para definición de posición vehicular específica dentro del área de trabajo en el entorno de simulación	130
Figura 59. Activación de puerto TCP 9999 mediante librería TraCI	131
Figura 60. Ventana de selección de entorno de simulación (Qtenv o Cmdenv).....	132
Figura 61. Componentes del entorno de simulación Qtenv	133
Figura 62. Selección de configuración para red de movilidad vehicular.....	134
Figura 63. Verificación de simulación de red vehicular	135
Figura 64. Selección de configuración para red de tratamiento de datos	135
Figura 65. Verificación de simulación de conectividad dual operativa.....	136
Figura 66. Creación de archivo de análisis .anf a partir de archivos de datos escalares .sca o vectoriales .vec	137
Figura 67. Contenido del archivo .anf pestaña Browse Data	138
Figura 68. Ejemplo de resultados obtenidos del submódulo Packets a partir del escenario red5g_NSA	139
Figura 69. Diagrama de operación de la red de comunicación de acuerdo con el hardware y software empleado para pruebas	143
Figura 70. Eventos generados en comunicación V2X bajo el estándar IEEE 802.11p	144

Figura 71. Modificaciones de código para pruebas de rendimiento de red vehicular sin paquetes beacon	146
Figura 72. Archivos de resultado generados para escenario de movilidad vehicular sin paquetes beacon	147
Figura 73. Archivos .anf resultantes para escenario de movilidad vehicular sin paquetes beacon	147
Figura 74. Inicialización de comunicación inalámbrica en red vehicular	148
Figura 75. Transmisión de datos en red vehicular V2I - identificación de nodo maestro	150
Figura 76. Paquetes totales enviados (11) para escenario de movilidad vehicular sin paquetes beacon	151
Figura 77. Paquetes totales perdidos (4) para escenario de movilidad vehicular sin paquetes beacon	151
Figura 78. Selección de tipo de simulación Balizamiento con frecuencia de 1[Hz] para entorno de movilidad vehicular.....	153
Figura 79. Archivos de resultado generados para escenario de movilidad vehicular con paquetes beacon a 1[Hz]	153
Figura 80. Archivos .anf resultantes para escenario de movilidad vehicular con paquetes beacon a 1[Hz]	154
Figura 81. Transmisión de datos en red vehicular V2I - identificación de paquete beacon a 1[Hz]	155
Figura 82. Paquetes totales enviados (1626) para escenario de movilidad vehicular con paquetes beacon a 1[Hz]	155

Figura 83. Paquetes totales perdidos (741) para escenario de movilidad vehicular con paquetes beacon a 1[Hz]	156
Figura 84. Throughput en [pps] de la red de movilidad vehicular bajo protocolo IEEE 802.11p	158
Figura 85. Archivos de resultado generados para escenario MEC 5G NSA bajo condiciones de movilidad vehicular	159
Figura 86. Archivos .anf resultantes para escenario MEC 5G NSA Uplink	160
Figura 87. Archivos .anf resultantes para escenario MEC 5G NSA Downlink	160
Figura 88. Diagrama de secuencia de eventos de procesamiento de datos para caso Uplink en red 5G NSA.....	161
Figura 89. Identificación del protocolo GTP en el diagrama delay del escenario Uplink 5G NSA	162
Figura 90. Valores RLC Throughput extraídos para la red MEC 5G NSA Uplink.....	164
Figura 91. Comparativa de valores de Throughput para tecnologías de radio 4G y 5G NSA .	166
Figura 92. Valores RLC Delay extraídos para la red MEC 5G NSA Uplink	167
Figura 93. Comparativa de Latencia para tecnologías de radio 4G y 5G NSA	168
Figura 94. Comparativa global de latencia en transmisiones para tecnologías de radio 4G y 5G NSA.....	169
Figura 95. Comparativa específica ue[0] de latencia en transmisiones para tecnologías de radio 4G y 5G NSA.....	169
Figura 96. Comparativa de jitter en transmisiones para tecnologías de radio 4G y 5G NSA ..	173
Figura 97. Valores CQI para transmisiones UE - estación base eNodeB 4G.....	174
Figura 98. Valores CQI para transmisiones UE - estación base gNodeB 5G.....	175

Figura 99. Comparativa de valores de CQI para tecnologías de radio 4G y 5G NSA	177
Figura 100. Entrevista realizada a Ing. Jairo Navarrete, funcionario 3 de Departamento de Planificación y Proyectos MOVIDELNOR E.P.	197

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. KPIs del sistema MEC según la definición del ETSI	44
Tabla 2. Características de 802.11p	50
Tabla 3. Casos de uso V2X.....	52
Tabla 4. Comparativa de simuladores de red utilizados para entornos inalámbricos	66
Tabla 5. Listado de paradas interactivas anteriormente operativas en la ciudad de Ibarra.....	76
Tabla 6. Abreviaturas de requerimientos definidos en estándar ISO/IEC/IEEE 29148:2018	79
Tabla 7. Stakeholders.....	79
Tabla 8. Requerimientos del sistema	80
Tabla 9. Requerimientos de arquitectura de la red de comunicación	84
Tabla 10. Validación de requerimientos del sistema sobre softwares de simulación de redes investigados con interpretación 1=CUMPLE y 0=NO CUMPLE.....	86
Tabla 11. Parametrización de condiciones de simulación para las redes IEEE 802.11p y 5G NSA.....	140
Tabla 12. Recopilación de pruebas de simulación para escenarios 802.11p con variación de beacon	157
Tabla 13. Paquetes de datos transmitidos por UEs	163
Tabla 14. Comparativa de valores de Throughput para tecnologías de radio 4G y 5G NSA ...	164
Tabla 15. Comparativa de valores de Latencia para tecnologías de radio 4G y 5G NSA	167
Tabla 16. Valores CQI para transmisiones UE - estaciones base 4G y 5G NSA	175
Tabla 17. Valores de referencia CQI	176
Tabla 18. Análisis documental de estudios referenciales sobre tecnologías aplicadas al proyecto	195

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo de Throughput.....	157
Ecuación 2. Cálculo de jitter	170
Ecuación 3. Cálculo de desviación estándar para jitter.....	170

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se realiza una propuesta de diseño de la infraestructura requerida para dar paso al servicio de paradas inteligentes para autobuses de transporte público en la ciudad de Ibarra – Ecuador, su enfoque está enmarcado en tecnologías de nueva generación, por lo que se evalúa la interacción entre el espectro inalámbrico de quinta generación en conjunto con la computación multiacceso de borde y redes vehiculares.

Se considera como punto de partida el proyecto “Paradas Inteligentes” implementados previamente en la ciudad de Ibarra por la administración pública anterior 2014 – 2019 en conjunto con las cooperativas de transporte “San Miguel de Ibarra” y “28 de Septiembre”; este determina los sitios estratégicos en donde se requiere la funcionalidad de elementos informativos que permitan a los ciudadanos conocer el estado de las rutas de los autobuses, lo que conlleva a la organización en la movilidad urbana, además de ello establece los requerimientos operacionales del sistema en términos de horas de alta afluencia de usuarios.

Luego de la investigación respectiva para el desarrollo de pruebas del entorno planteado, se ha determinado establecer un ambiente de simulación debido a la limitada y casi nula existencia en el país de las tecnologías mencionadas, para ello se toma como base Omnet++ v.6.0, ya que este permite evaluar protocolos entorno a redes vehiculares y tecnologías de nueva generación.

Con el plan operacional previsto para un área geográfica definida en el centro de la ciudad de Ibarra por su mayor afluencia vehicular, se ha determinado hacer uso de una configuración 5G NSA – Non Stand Alone, misma que depende de la infraestructura core de 4G; para ello las estaciones base 5G requieren una potencia de alrededor de 40[dBm] con el fin de brindar cobertura a la zona de manera óptima y omnidireccional, mientras que por parte de las unidades móviles se

establece una potencia de 23[dBm] de acuerdo al marco regulatorio vigente por parte de la UIT, ETSI, 3GPP y de manera local ARCOTEL.

Esta parametrización en conjunto a configuraciones de equipos de comunicación se detalla en el capítulo 4 de este documento, mismo que corresponde a la IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS y RESULTADOS del proyecto; dicha información proporciona una comparativa verificada entre las tecnologías 4G y 5G en redes vehiculares, utilizando la plataforma de simulación Omnet++ en su versión 6.0. Los resultados obtenidos demuestran que la tecnología 5G ofrece un rendimiento superior en términos de latencia y jitter en comparación con la tecnología 4G y a un entorno VANET con dependencia Ad-Hoc operativo bajo el estándar IEEE 802.11p, debido a las mayores tasas de transferencia de datos y menores tiempos de retardo. Estos hallazgos proporcionan un punto de partida para futuras evaluaciones en relación con los recursos disponibles en Ecuador y pueden ser utilizados para tomar decisiones informadas sobre la implementación de tecnologías avanzadas en redes vehiculares en el país.

ABSTRACT

In the present academic project, a proposal is made for the design of the infrastructure required to make way for the service of intelligent stops for public transport buses in the city of Ibarra - Ecuador, its approach is framed in new generation technologies, for which the interaction between the fifth-generation wireless spectrum in conjunction with multi-access edge computing and vehicular networks is evaluated.

The "Smart bus stops" project previously implemented in the city of Ibarra by the previous public administration 2014 - 2019 in conjunction with the "San Miguel de Ibarra" and "28 de Septiembre" transport cooperatives is considered as a hypothesis; This determines the strategic sites where the functionality of informative elements is required that allow citizens to know the status of the bus routes, which leads to the organization in urban mobility, in addition to this, it establishes the operational requirements of the system in terms of hours of high influx of users.

After the respective investigation for the development of tests of the proposed environment, it has been determined to establish a simulation environment due to the limited and almost null existence in the country of the mentioned technologies, for this Omnet++ v.6.0 is taken as a base, since that this allows evaluating protocols around vehicular networks and new generation technologies.

With the operational plan foreseen for a geographical area defined in the center of the city of Ibarra due to its greater vehicular influx, it has been determined to use a 5G NSA - Non Stand Alone configuration, which depends on the 4G core infrastructure; For this, the 5G base stations require a power of around 40[dBm] in order to provide coverage to the area optimally and omnidirectionally, while the units establish a power of 23[dBm] according to the current regulatory framework by the UIT, ETSI, 3GPP and locally ARCOTEL.

This parameterization together with communication equipment configurations is detailed in chapter 4 of this document, which corresponds to the IMPLEMENTATION, TESTS and RESULTS of the project; This information provides a verified comparison between 4G and 5G technologies in vehicular networks, using the Omnet++ simulation platform in its version 6.0. The results obtained show that 5G technology offers superior performance in terms of latency and jitter compared to 4G technology and a VANET environment with Ad-Hoc dependency operating under the IEEE 802.11p standard, due to higher data transfer rates. and shorter delay times. These tests determined a starting point for future evaluations regarding the resources available in Ecuador and can be used to make informed decisions about the implementation of advanced technologies in vehicular networks in the country.

1. CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

Como primer capítulo del estudio planteado se da a conocer los fundamentos base que permiten establecer la propuesta, así como los objetivos de desarrollo en donde se aplica criterios de ingeniería.

1.1 Definición del Problema

La evolución tecnológica que se ha dado en los últimos años alrededor del mundo ha permitido la introducción de varios sistemas autónomos con el fin de construir una cultura digital; un claro ejemplo de ello fue perceptible a nivel local en la ciudad de Ibarra, ciudad en la cual durante el mes de mayo del pasado año 2015 se dio inicio a un proceso de innovación en el transporte público mediante la implementación de 150 paradas inteligentes, mismas que daban a conocer a los usuarios el estado de las rutas y la proximidad de los autobuses en base a tecnología GPS y enlaces satelitales para así fortalecer el desarrollo urbano organizado (TVNCanal, 2015), dicho proyecto con duración prevista de tres años reflejó sus resultados físicos de primera etapa el 24 de septiembre del año 2016 con las primeras ocho paradas inteligentes utilizables, las cuales fueron financiadas por las cooperativas 28 de Septiembre y San Miguel de Ibarra (TVNCanal, 2016); este proyecto no fue muy óptimo debido a los retardos en la comunicación lo que provocaba una ineficiente actualización de datos en los nodos “paradas” con mayor aglomeración de usuarios y por ello un descontento en la ciudadanía, adicional a ello en el año 2018 la empresa encargada de la administración del proyecto, denominada “De Impacto” de origen español, decidió cerrar sus puertas y con ello el servicio que otorgaba a los usuarios dejando así hasta la fecha el proyecto inconcluso y con infraestructura no utilizable más allá de para publicidad del municipio de la ciudad y auspiciantes del proyecto paradas inteligentes (EXPECTATIVA, 2018).

El uso de tecnologías cuyo fin no es la transmisión de datos en tiempo real y la no planificación presupuestaria para mantenimiento de infraestructura dio paso a que no se obtengan los resultados esperados dejando así los cimientos de una Smart City, por lo tanto los equipos implementados sobre las paradas pasaron a ser un adorno más de la ciudad blanca que únicamente presentan información publicitaria, es decir cumplen una función de las previstas, la cual es auto sustentabilidad a través de la venta de espacio publicitario, al contrario de la interactividad que se esperaba; por parte de las unidades de transporte únicamente como servicio tecnológico se brinda hoy en día conectividad Wifi a los usuarios en un bajo porcentaje dado que al ser vehículos rústicos no toda la tecnología es compatible para sacarle el mayor provecho (LaHora, 2019); para el gerente de planificación y transporte de Movidelnor E.P Juan Manuel Fuertes, “la administración pública frecuentemente hace inversiones para la construcción de obras, pero no necesariamente se destinan luego valores que corresponden al mantenimiento preventivo y para reparación de la misma” (DiarioELNORTE, 2021), debido a este caso no se ha podido dar un mantenimiento tecnológico a la obra para así conservar su operatividad.

Con el fin de dar continuidad al proyecto “paradas inteligentes” se considera bajo criterio técnico la incorporación de nuevas tecnologías que garanticen enlaces eficientes de baja latencia entre unidades de transporte y nodos, que en este caso son las paradas, para ello una de las tecnologías de vanguardia que se presta para una próxima explotación comercial en el país es 5G, la cual conjuntamente con MEC (MultiAccess Edge Computing) y sistemas de comunicación vehicular da lugar a la pronta interpretación de información en los micro servidores operativos en cada nodo ya que se realiza una distribución optimizada de datos (ETSI, 2021), lo que en el mejor de los casos permitirá a la ciudadanía beneficiarse de un entorno de transporte organizado e inteligente, a la vez que conocer estados viales o previsiones meteorológicas; dicha tecnología no

se encuentra de forma comercial en Ecuador pero dado que su llegada es inminente es necesario considerar futuras aplicaciones que permitan al sector comercial e industrial beneficiarse de la misma (Ulloa Saltos, 2018).

Las paradas inteligentes son una herramienta que permite construir una sociedad organizada, dicho aplicativo ya está operativo en países desarrollados bajo dependencia de energías alternativas; se cita como referencia la ciudad de Barcelona – España, en donde desde 2017 se cuenta con un sistema operativo por radiofrecuencia para la gestión de datos sobre pantallas informativas alimentadas por energía solar con autonomía de hasta 15 días, mismas que muestran información en tiempo real que se actualiza cada 30 segundos y permite a los usuarios conocer intuitivamente información municipal y de servicio de proximidad de transporte, a la vez que brinda a los usuarios funciones adicionales como acceso Wifi o punto de carga de dispositivos móviles (ZICLA, 2017); bajo las observaciones antes expuestas es notable la ineficiencia de un enlace satelital para la interpretación de datos en tiempo real ya que los equipos transmisores y receptores deben utilizar una potencia fija y alta lo que vuelve más complejo el sistema, por el contrario al usar enlaces de radiofrecuencia se cuenta con transmisiones más eficientes que a la vez hacen uso de infraestructura terrestre, en donde el mayor provecho en velocidad se obtiene a altas frecuencias.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Desarrollar una propuesta de sistema de comunicación que permita analizar el desempeño de la tecnología MEC sobre redes inalámbricas de quinta generación en conjunto con comunicación V2X para la actualización y anuncio en tiempo real de rutas de autobuses de transporte público en paradas inteligentes de la ciudad de Ibarra.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Recopilar información bibliográfica referente a operatividad de la tecnología MEC en redes 5G, así como de la situación actual del proyecto “Paradas Inteligentes” implementado previamente en la ciudad de Ibarra.
- Establecer los requerimientos necesarios en base al modelo en cascada para llevar a cabo el análisis de la tecnología MEC sobre redes inalámbricas de quinta generación en conjunto con redes vehiculares basadas en comunicación V2X.
- Plantear un escenario de simulación que permita aplicar los requerimientos definidos para la identificación de rutas de transporte de autobuses públicos y actualización de datos en tiempo real sobre equipos de visualización ubicados en paradas inteligentes específicas.
- Determinar beneficios del sistema propuesto en el entorno planteado, además de especificaciones técnicas que se requieran para la operatividad de la red.

1.3 Alcance

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo el análisis de desempeño de la comunicación multiacceso con micro servidores de borde para redes inalámbricas de quinta generación en conjunto con comunicación V2X para la actualización y anuncio en tiempo real de rutas de autobuses de transporte público en paradas inteligentes de la ciudad de Ibarra; esta tecnología de vanguardia ha dado lugar alrededor del mundo al desarrollo de proyectos de automatización y redes inteligentes que permiten el intercambio eficiente de información entre equipos de procesamiento y terminales gracias al uso de altas frecuencias que garantizan el envío de una mayor tasa de bits por Hertzio; para dicho análisis se plantea realizar una propuesta de

diseño de un sistema de comunicación a partir de la caracterización de infraestructura de un proyecto anteriormente implementado en la ciudad de Ibarra – Ecuador bajo el mismo enfoque.

Para el desarrollo de este proyecto en primer lugar, se realiza un estudio de estado actual de las paradas inteligentes anteriormente implementadas en la ciudad de Ibarra, así como un estudio teórico de las tecnologías propuestas, conceptos básicos, características, parámetros de comunicación, ventajas y desventajas de su aplicabilidad en proyectos similares en países que cuentan con servicios de radiofrecuencia de quinta generación de forma comercial.

La propuesta de estudio planteada se basa en el modelo en cascada para lo cual con el fin de dar cumplimiento a cada una de sus etapas se procede de la siguiente forma; como primera etapa se parte de la definición de requerimientos del sistema, fundamentalmente se considera como medio de transmisión inalámbrica el rango de frecuencia 5.895 – 5.925 GHz definido por la FCC (Comisión Federal de Comunicaciones USA) para redes vehiculares (Moscardó García, 2021) (Federal Communications Commission, 2018), ya que se hace uso de tecnología de comunicación V2X para enlaces vehículo a vehículo y vehículo a infraestructura, dicha comunicación está basada en el uso de Sistemas Inteligentes de Transporte que permiten conocer advertencias como cambios de carril o estado vial, lo cual no corresponde a este estudio ya que dicho proyecto se centra en evaluar la aplicabilidad en cuanto a la actualización de información de rutas y estado vial bajo el uso de GPS (Sistema de Posicionamiento Global), dispositivo cuya ubicación para una futura implementación se sugiere dentro de las unidades de transporte público que ofrecen las Cooperativas 28 de Septiembre y San Miguel de Ibarra que prestan servicio dentro de la ciudad, de esta forma se considera la captura de datos de velocidad, tiempo, altitud y distancia, así como la ruta ejecutada por los autobuses durante su jornada diaria de recorrido (Díaz Tituaña, 2019); como siguiente etapa se realiza el diseño del sistema, para lo cual se proyecta un procesamiento

de datos en nodos micro servidores ubicados estratégicamente en paradas de la ciudad, los cuales al capturar los datos de estado de las rutas y vehículos en una plataforma general, procesaran dicha información en un middleware para finalmente exponer los datos informativos sobre pantallas LED o similares, permitiendo así que la ciudadanía pueda conocer en tiempo real el estado de las rutas y la proximidad de las unidades de transporte público urbano.

Una vez establecidos los requerimientos del sistema e integrados al diseño el mismo se ejecuta como tercera etapa su evaluación a través del uso de software de simulación ya que en este caso no se realizará implementación; para ello mediante el estándar ISO/IEC/IEEE 29148 se definen las directrices para la aplicación de requisitos y procesos (ISO/IEC, 2018); con ello se procede a evaluar el rendimiento en cuanto a la gestión de datos para así definir el tiempo de actualización de información sobre cada uno de los nodos de borde ubicados en paradas inteligentes y poder determinar los beneficios del uso de frecuencias de quinta generación en el entorno planteado; finalmente para dar cumplimiento a la etapa de retroalimentación dicho estudio se complementa con la definición de especificaciones técnicas que se requieren para la operatividad de la red en el caso de una futura implementación ya que no se contempla una etapa de operación y mantenimiento más allá de un entorno simulado.

1.4 Justificación

El sector de las telecomunicaciones avanza cada día a razón de que cada vez son más las necesidades que cubre el adecuado uso de las tecnologías con el único fin de promover el desarrollo social a beneficio de entornos estratégicos tales como salud, academia, transporte, entre otros.

En la ciudad de Ibarra – Ecuador en el año 2015 fue palpable el salto tecnológico que tuvo lugar en el área de transporte, ya que se dio inicio a la implementación del proyecto “Paradas

Inteligentes” (TVNCanal, 2015), cuya función radicaba principalmente en informar a la ciudadanía la proximidad de los autobuses de transporte público urbano conjuntamente con funciones adicionales de publicidad y acceso Wifi, lo cual fue óptimo en su momento, ya que hasta la fecha dicha infraestructura únicamente es publicitaria; hoy en día debido al inminente crecimiento de datos es necesario el uso de sistemas de comunicación robustos y duraderos que garanticen el adecuado intercambio de información, por lo cual se propone el análisis de desempeño de frecuencias de radio de quinta generación con el fin de lograr enviar una mayor cantidad de bits por Hertzio a través del espectro radioeléctrico, dicho proyecto está enfocado a un nivel de aplicabilidad sustentable en el tiempo con base al objetivo 5 del Plan Nacional el Buen Vivir 2017 – 2021 , el cual recalca “Impulsar la productividad y competitividad para el crecimiento económico sostenible de manera redistributiva solidaria” y con mayor énfasis en su política 5.8 cuyo enfoque es “Fomentar la producción nacional con responsabilidad social y ambiental, potenciando el manejo eficiente de los recursos naturales y el uso de tecnologías duraderas y ambientalmente limpias, para garantizar el abastecimiento de bienes y servicios de calidad” (Consejo Nacional de Planificación (CNP), 2017).

Con lo antes mencionado dicho proyecto aportará a futuro en gran medida en el caso de implementación ya con las radiofrecuencias de quinta generación definidas como comerciales en el país; al ser 5G una tecnología reciente su administración se somete a constantes cambios de adaptabilidad que le permitan fortalecer sistemas de comunicación haciendo uso de infraestructura existentes, lo que da paso a su desarrollo enfocado a servicios de gran calidad, esto se puede complementar con el uso de energías alternativas con el fin de promover el uso de sistema de energización limpios, lo cual garantizara la automatización del sistema a la vez que su sostenibilidad y sustentabilidad, al mismo tiempo que abre el camino al estudio de radio

frecuencias de quinta generación enfocado a la prestación de servicios eficientes a la población local y nacional.

2 CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

En este capítulo se evalúa las tecnologías 5G¹, MEC² y V2X³ involucradas en el desarrollo del proyecto, considerando la coexistencia de estas en el entorno planteado; para lo mencionado se considera su evolución, arquitectura y nivel de aplicabilidad de acuerdo con parámetros de operación. Además, se examina el estado actual del proyecto “Paradas inteligentes” implementado previamente en la ciudad de Ibarra, mismo que permite fortalecer el enfoque del presente estudio.

2.1 Redes Móviles

Las redes móviles se establecen como radiocomunicaciones operativas en base a ondas radioeléctricas, las cuales permiten la convergencia de estaciones fijas con estaciones móviles, su clasificación está basada en el nivel de desplazamiento de los móviles sobre el entorno terrestre (Narváz Ortiz, 2018); estas han sido de gran aporte en la nueva era tecnológica ya que han dado paso al desarrollo de sistemas complejos y a la vez autónomos de gran utilidad para el diario vivir de distintas industrias, principalmente la comunicación de datos o voz, lo que permite el envío y recepción de información de uno a otro punto con la ayuda de equipos especializados capaces de procesar señales radioeléctricas, su desarrollo se ha venido dando en función de la demanda de servicios requerida por los usuarios, lo que ha generado la constante evolución de generación en generación partiendo a gran escala de 2G a 3G, 4G, 5G y futuro la inminente 6G precautelando siempre la comunicación efectiva bajo criterios de sostenibilidad y sustentabilidad.

A continuación se da a conocer de forma clara el nivel de aplicabilidad de cada una de las generaciones de redes móviles así como sus parámetros de operación, y de manera enfática su aporte a un entorno de ciudad inteligente, lo cual se ha venido implementando con soporte parcial

¹ 5G: Quinta generación de redde móviles

² MEC: MultiAccess Edge Computing

³ V2X: Vehicle to Everything

desde 4G con aplicaciones más allá de telefonía; ya que su infraestructura no abastece los servicios necesarios para ciudades inteligentes y sostenibles, a la fecha se encuentra en desarrollo 5G a razón de su potencial para conectar una mayor cantidad de dispositivos a internet, lo que le permite procesar un gran volumen de datos con un mínimo retardo (UIT, 2021).

2.1.1 2G y 3G

2G y 3G son los términos comerciales con los que se conoce a la segunda y tercera generación de comunicaciones móviles regidas por tecnología celular, denominadas así ya que operan a base de celdas que contienen una estación base; estas están representadas por un conjunto de estándares y sistemas de comunicación digital de banda estrecha.

El nacimiento de 2G se dió a principios de los años noventa como solución a la inminente demanda de comunicación que no era soportada bajo roaming por los sistemas analógicos de primera generación (1G) operativos desde 1979 bajo estándares desarrollados por empresas privadas como AT&T, Motorola, BELL o Ericsson, lo que a la vez dificultada el desarrollo de mercados de mayor volumen, entre los estándares más predominantes para 1G se encuentran AMPS⁴, el cual operaba en la banda de 800-900 [MHz] (Mereci Apolo, 2020); para ello el desarrollo de 2G partió de la implementación de estándares a nivel de industrias regionales en el mundo, siendo los pioneros Europa, USA, Canadá, Japón y Corea del Sur; los cuales con la regionalización de sus estándares delimitaron el uso de una radiofrecuencia específica, mejorando así la compatibilidad intra regional y por consiguiente las áreas económicas de más influencia, ya que por primera vez se introducía en la sociedad sistemas que permitían la digitalización de

⁴ AMPS: Advanced Mobile Phone System

servicios móviles de voz, intercambio de SMS⁵ y transmisión de datos de baja velocidad (9.6 [kbps] – 14.4 [kbps]).

Las principales industrias que impulsaron la segunda generación de comunicaciones digitales son USA y Europa, estas destacaron por la introducción de los estándares IS-136/D-AMPS (ISA), GSM⁶ (Europa), ITU⁷ IS-95/CDMA⁸ One (USA y Asia), GPRS⁹ y EDGE¹⁰, mismos que lograron una gran presencia en el mercado para la época (Sandoval Vásquez, 2018); a continuación en base a la Figura 1 se da a conocer detalles técnicos y características del estándar abierto de 2G con mayor acogida en el mundo, conocido como GSM, el cual mantuvo un firme éxito y lo hace hasta el día de hoy con aplicaciones en la industria IoT¹¹ y ciudades inteligentes en casos de transmisión de datos limitada.

⁵ SMS: Short Message Service

⁶ GSM: Global System for Mobile

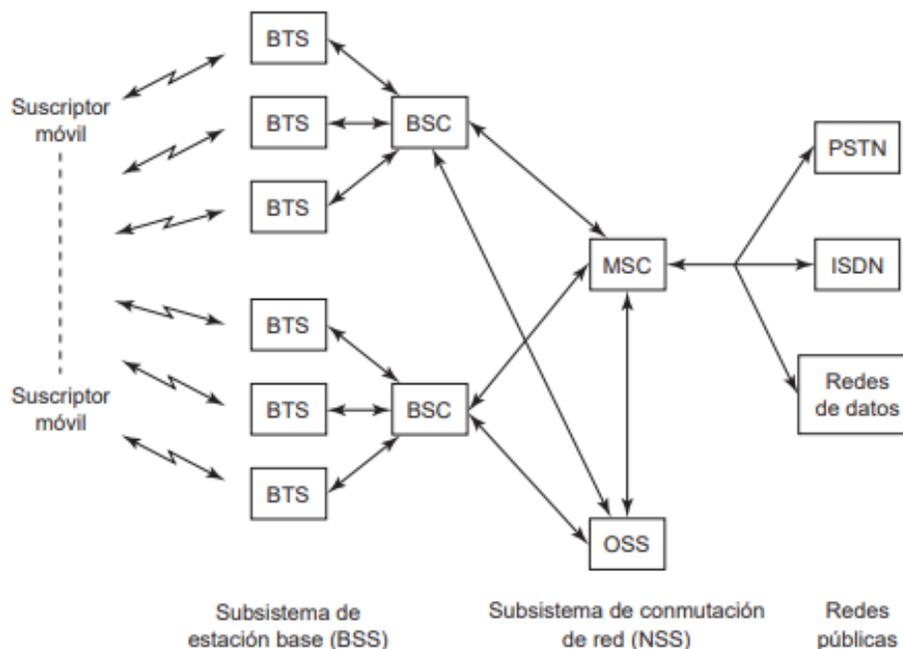
⁷ ITU: International Telecommunication Union o en español UIT

⁸ CDMA: Code Division Multiple Access

⁹ GPRS: General Packet Radio Service

¹⁰ EDGE: Enhanced Data Rates for GSM Evolution

¹¹ IoT: Internet of Things

Figura 1.*Arquitectura de comunicación GSM*

Fuente. (Tomasi, 2003)

La segunda generación de comunicaciones móviles está estructurada en función a estaciones base para cada celda de comunicación operando en las bandas de frecuencia GSM 900 – DCS¹² 1800 – PCS¹³ 1900 [MHz] , ofreciendo así una amplia gama de servicios de datos con transmisión de hasta 9600 [bps] (Tomasi, 2003); su estructura está conformada por usuarios móviles que generan peticiones hacia un subsistema de estaciones base el cual agrupa una infraestructura específica compuesta por BTS¹⁴ ubicadas en el centro geográfico de la celda con disposición de uno a doce transceptores TRX operativos bajo frecuencia asignada, a la vez estas

¹² DCS: Digital Cellular Service

¹³ PCS: Personal Communications Service

¹⁴ BTS: Base Transceiver Station

se encuentran enlazadas a estaciones controladas BSC¹⁵. Las BTS se encargan de la transmisión y recepción de radio señales bajo operación de equipos dedicados regidos por antenas, entre sus principales funciones está procesamiento, codificación y enlazado de la señal bajo potencia acorde al tamaño absoluto de la celda.

En la siguiente etapa de la arquitectura GSM, las BSC se encargan del cifrado de la comunicación, ejecución de algoritmos de transmisión discontinua bajo identificación de periodos de actividad y fundamentalmente la administración de recursos de radio con asignación y liberación de canales; posteriormente se ejecuta la etapa de conmutación en el/los elementos MSC¹⁶ y NSS¹⁷ para encaminar las llamadas en la red, MSC realiza funciones de administración de movilidad para comunicaciones entre usuarios móviles dentro de su área de servicio, mientras que NSS en comunicaciones móviles a fijas, permitiendo así a los usuarios móviles mantener comunicación dentro y/o fuera de su propia red permitiendo así establecer como etapa final la redirección de datos a la red pública (Sandoval Vásquez, 2018).

Por otro lado, la tercera generación de comunicación móvil conocida como 3G, apareció como sucesor de 2G brindando una mayor capacidad de transmisión consecuencia de la introducción de la banda ancha, su definición comenzó a establecerse por la ITU en 1985 denominándose inicialmente FPLMTS¹⁸ y a posterior la familia de estándares IMT¹⁹-2000 con bandas de frecuencia reservadas a nivel internacional, gracias a sus esfuerzos la ITU logró establecer estándares englobados bajo IMT-2000 conocidos de forma comercial como WCDMA²⁰,

¹⁵ BSC: Base Station Controller

¹⁶ MSC: Mobile Switching Center

¹⁷ NSS: Network Switching Subsystem

¹⁸ FPLMTS: Future Public Land Mobile Telecommunication System

¹⁹ IMT: International Mobile Communications

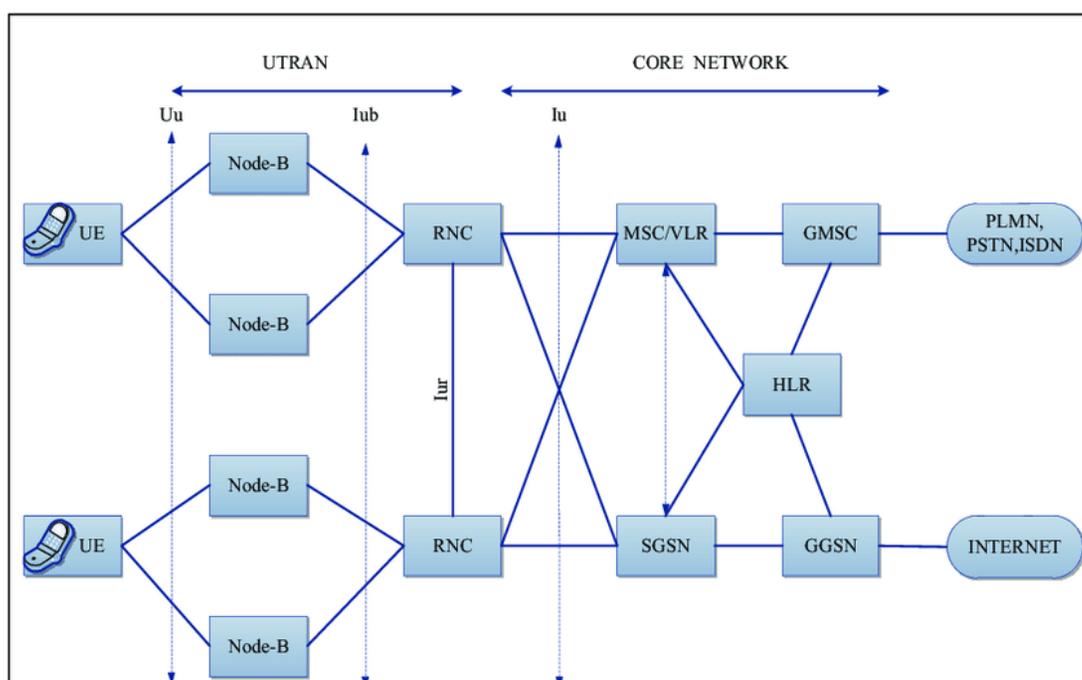
²⁰ WCDMA: Wideband Code Division Multiple Access, parte de UMTS

TDCDMA²¹, TDSCDMA²², CDMA2000 y UWC²³-136; los cuales favorecieron la comunicación móvil como se conocía.

La Figura 2 describe de forma técnica la arquitectura 3G con su sistema más usado para llamadas de voz UMTS²⁴ bajo conmutación de circuitos y paquetes, así como sus elementos de red; dicho sistema brinda capacidades de 144 [kb/s] en entornos rurales, 384 [kb/s] en entornos suburbanos y 2 [Mb/s] en entornos urbanos (ocw.upm.es, 2022).

Figura 2.

Arquitectura de comunicación UMTS



Fuente. (Faruk & Gumel, 2015)

²¹ TDCDMA: Corresponde a una de las 6 interfaces de radio de los estándares 3G o IMT-2000 y se basa en el acceso múltiple por división de tiempo y acceso múltiple por división de código

²² TDSCDMA: Time Division Synchronous Code Division Multiple Access

²³ UWC: Universal Wireless Communications

²⁴ UMTS: Universal Mobile Telecommunications System

La operación de la red de telefonía móvil de tercera generación se divide en dos etapas de comunicación comprendidas como UTRAN y Core Network, las cuales actúan de manera fundamental en el procesamiento de las señales radioeléctricas y transporte de datos de tráfico y señalización antes de llevarlas a la red pública y encaminarlas a su destino; la radio UTRAN o subsistema de red de radio es parte del estándar UTRA²⁵ y conforma la red de acceso en donde las estaciones base mediante sus transceptores o Node-B reciben y transmiten peticiones y solicitudes respectivamente por parte de los usuarios inalámbricos UE²⁶ dentro de la celda.

Como etapa posterior se encuentra el controlador de recursos de radio RNC que a su vez actúa como punto de cifrado/descifrado de datos, este con el fin de garantizar la comunicación efectiva entre las estaciones base se comunica con la red central y con los RNC vecinos como se muestra en la Figura 2; una vez que los datos han sido tratados en la fase UTRAN pasan a la siguiente fase que involucra todo el procesamiento y gestión central del sistema bajo conmutación, en esta fase participan fundamentalmente el MSC para conmutación de circuitos y el SGSN²⁷ para conmutación de paquetes (electronicsnotes, 2022; UDLAP, 2022).

2.1.2 4G

La cuarta generación de comunicación móvil corresponde a las tecnologías capaces de cumplir con la normativa IMT-Advanced, en donde figuran LTE²⁸ Advanced, WiMAX 2.0 y como tecnología de entrada HSPA+²⁹.

LTE Advanced tuvo su origen gracias a la UIT, organismo que emitió una circular de requerimientos en 2008 posterior a evaluaciones de rendimiento de la tecnología, para lo cual en

²⁵ UTRA: UMTS Terrestrial Radio Access

²⁶ UE: User Equipment

²⁷ SGSN: Service GPRS Support Node

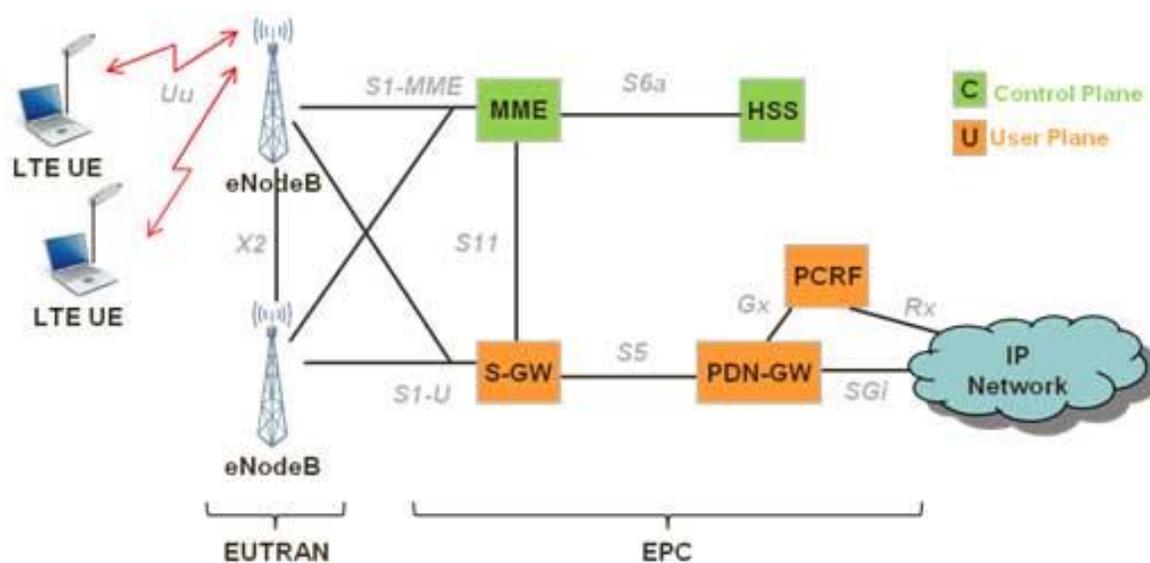
²⁸ LTE: Long Term Evolution

²⁹ HSPA+: High Speed Packet Access Plus

2007 se realizó pruebas de rendimiento con alta demanda sobre automóviles en Japón, a continuación se profundiza en sus características de operación: esta tecnología está basada totalmente en IP³⁰ permitiendo así la convergencia de redes alámbricas e inalámbricas; además, esta tecnología introdujo el concepto de agregación de portadora para usar el ancho de banda de 100 [MHz] y por consiguiente OFDMA³¹ para el enlace de descarga/Downlink como método de acceso al medio, dando lugar a capacidades de transmisión teóricas de hasta 1 [Gb/s] en DownLink y 500 [Mb/s] en enlace de carga Uplink en baja movilidad y hasta 100 [Mb/s] en Downlink y 12.5 [Mb/s] en Uplink en alta movilidad, (Calle Cáceres, 2013).

Figura 3.

Arquitectura de comunicación LTE



Fuente. (www.ipv6go.net, 2022)

³⁰ IP: Internet Protocol

³¹ OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access

A continuación, tomando como base la Figura 3, se describe de forma técnica la operación de la red LTE; misma que está conformada principalmente por los UE, quienes realizan peticiones de comunicación hacia los equipos eNodeB³², definidos como híbridos entre estación base y controlador de gestión de movilidad, equivalente a NodeB en 3G o estaciones base para 2G; este elemento opera bajo transceptores para cada celda en la etapa denominada EUTRAN misma que procesa en capas de red radio RNL, en donde se direcciona la información a través de interfaces entre nodos lógicos, y transporte TNL para a través de un backhaul móvil mediante IP enviar a una siguiente etapa denominada EPC³³ (ETSI, 2017).

En la comunicación de radio, LTE Advanced opera a una banda estandarizada de 2600 [MHz] lo que garantiza el óptimo uso de recursos físicos omitiendo así la dependencia de dominio de circuitos, la red de señalización SS7 y los controladores de radio, ya que todo el proceso de transporte y control se centra en el núcleo de la red o EPC, mismo que está conformado por conmutadores de paquetes, servidores de bases de datos y servidores de control; como elementos fundamentales de esta etapa destacan MME³⁴ que opera como servidor de señalización para la gestión de movilidad y de sesiones, HSS³⁵ que es la base central de datos de usuario, S-GW³⁶ que gestiona el intercambio de datos entre la red de acceso y el núcleo de la red IP, además de funcionar como traspaso entre otras redes 3GPP³⁷; PDN-GW³⁸ es el punto de interconexión entre el núcleo de la red EPC y la redes IP externas denominadas PDN; todo el proceso se realiza mediante

³² eNodeB: Evolved NodeB

³³ EPC: Evolved Packet Core, representa el core de una red LTE.

³⁴ MME: Mobility Management Entity

³⁵ HSS: Home Subscriber Server

³⁶ S-GW: Serving Gateway

³⁷ 3GPP: Unión de organizaciones de desarrollo de estándares y especificaciones que definen tecnologías de telecomunicaciones en lo que se conoce como 3rd Generation Partnership Project bajo la intervención de ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDI, TTA, TTC.

³⁸ PDN-GW: Packet Data Network Gateway

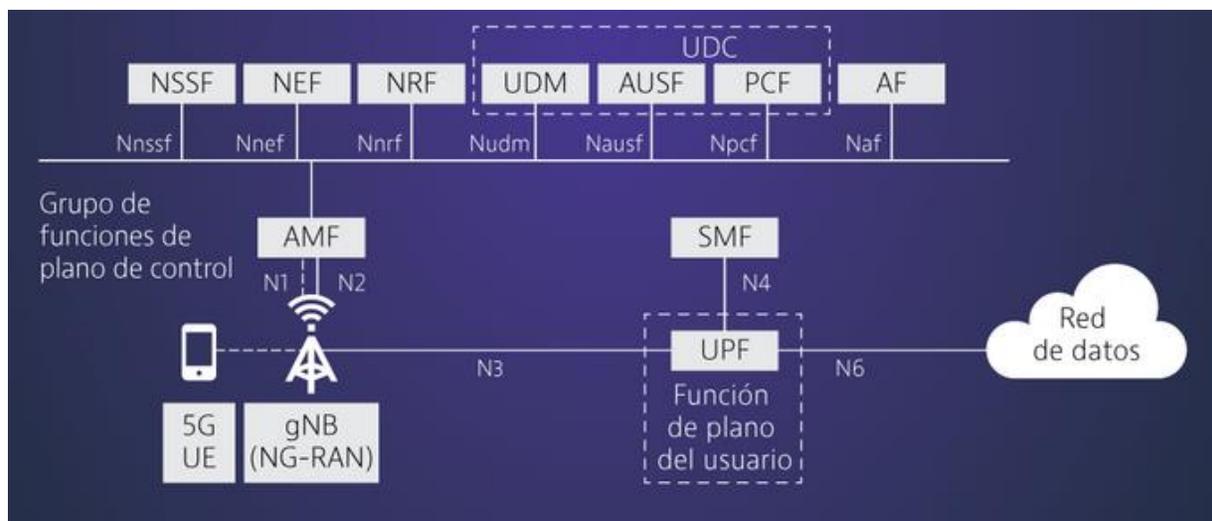
enrutamiento de paquetes a través de interfaces dedicadas, finalmente PCRF hace referencia a la función de políticas y reglas de carga en la tecnología (Álvarez Campana, 2015).

Los equipos y dispositivos mencionados en conjunto garantizan una comunicación óptima de voz y datos en entornos con alta demanda de suscripción en donde los beneficios de comunicación son explotados al máximo en varias industrias, hoy en día telefonía móvil e IoT es lo más destacado.

2.1.3 5G

Tras la evolución tecnológica y la alta demanda de recursos para intercambio de información digital, se dió a conocer en los últimos años la quinta generación de comunicación móvil, misma que destaca por su alta tasa de transmisión de datos en base a una arquitectura más inteligente con redes RAN³⁹, lo que le permite brindar una amplia gama de servicios inalámbricos a usuarios finales a través de redes multicapa y plataformas de acceso regidos por especificaciones proporcionadas por 3GPP; el espectro usado por dicha generación de comunicaciones móviles abarca el rango de ondas milimétricas de frecuencia extremadamente alta EHF comprendidas entre 30 [GHz] a 300 [GHz] y bajo adaptación el rango de Ultra alta frecuencia UHF entre 300 [MHz] a 3 [GHz]; como primera etapa el rango comprendido entre 24 [GHz] y 100 [GHz] se encuentra en proceso designación a diversas partes del planeta, dando paso así a la adecuación en función de los servicios que se vayan a prestar, ya que para cada caso se emplea un ancho de banda único; para ello es fundamental tomar en cuenta que el alcance a altas frecuencias es menor, lo que conlleva a designar a 5G como una tecnología única para comunicación eficiente en poblaciones de alta densidad y principalmente en entornos urbanos (VIALVI, 2022).

³⁹ RAN: Radio Access Network

Figura 4.*Arquitectura básica de comunicación 5G Stand Alone*

Fuente. (VIALVI, 2022)

La operatividad de 5G parte de especificaciones precisas en el entorno inalámbrico con el fin de brindar un mayor ancho de banda y por consiguiente una capacidad de red ilimitada para el intercambio de datos regido bajo el concepto de 5G New Radio – NR definido por 3GPP como la interconexión de varias bases radioeléctricas a la red central, próximamente en conjunto con MIMO Masivo⁴⁰ y Femtocell permitirá el despliegue de la futura comunicación móvil bajo infraestructuras independientes o Stand Alone (SA), cuya arquitectura se muestra en la Figura 4 y dependientes o Non Stand Alone (NSA) con arquitectura descrita en la Figura 5, esta última permite reutilizar la infraestructura 4G usando una conexión dual de EPC (Mohanty et al., 2021); su operatividad está estructurada de forma similar a las generaciones pasadas, partiendo fundamentalmente por los UE quienes poseen frecuencias definidas para transmisión y recepción por ondas milimétricas, mismas que se encuentran dentro de los límites definidos anteriormente,

⁴⁰ MIMO Masivo: Masive Multiple Input, Multiple Output

los cuales generan peticiones dentro del rango de la celda que rige el gNodeB; para procesar dichas peticiones se emplea un proceso más inteligente sobre todo en NSA, en donde en el core conocido como EN – DC (E-UTRAN NR – Dual Connection) se encuentra el nodo lógico 5G gNodeB como nodo secundario conectado a las estaciones base 4G eNodeB como nodos maestros mediante interface X2⁴¹ para su comunicación física a través de peticiones; a la vez este sistema esta soportado por conexiones S1-U, usada entre el gNodeB y la EPC con el S-GW a fin de ejecutar la gestión a de conexión a internet mediante el enrutamiento de paquetes de datos de usuario; por otro lado se cuenta con la conexión S1 encargada de la gestión de datos entre las estaciones base primarias que son, eNodeB y la EPC; de esta forma se establece un flujo de datos estable bajo el uso de recursos definidos en las infraestructuras 4G y 5G.

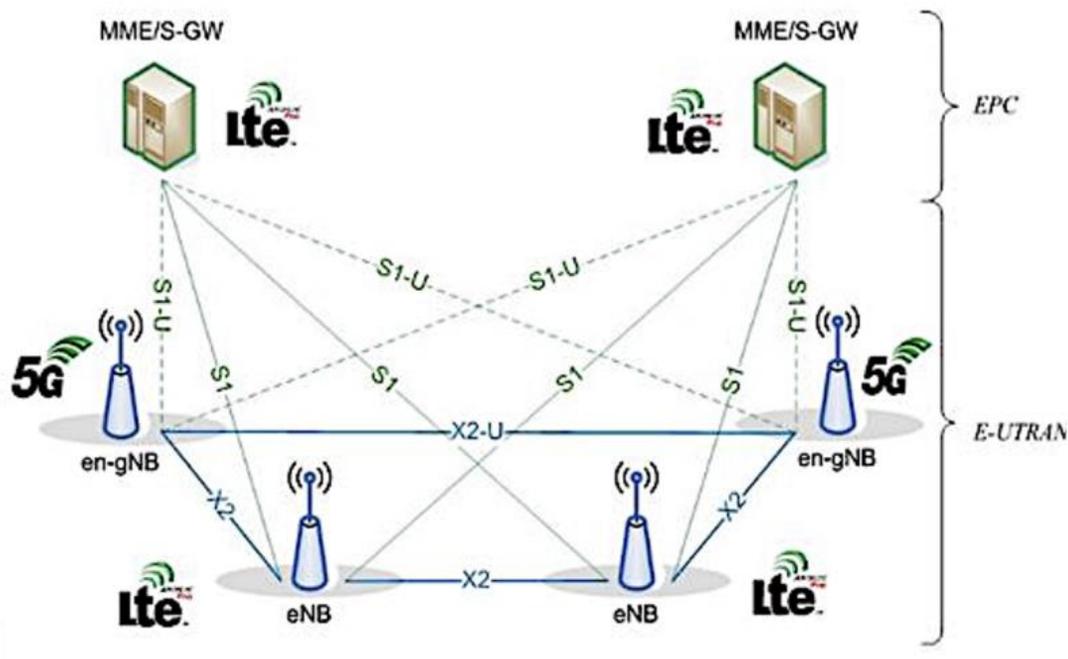
Alternativamente se puede crear una EPC virtualizada para admitir NSA independientemente, de esta forma la conectividad 4G y 5G están disponibles; a la vez para la gestión de la conectividad de señalización en el plano de control MN bajo movilidad es necesaria la operación del elemento MME para enlazar a los UE, de esta forma se diversifica el uso de la infraestructura definido bajo control del Master Node – MN o un Secondary Node – SN y así establecer por ejemplo el uso de datos a 5G y la señalización o voz IMS⁴² a 4G, el concepto de operación de 5G bajo NR se basa en 4G principalmente por el esquema de modulación OFDMA y la multiplexación TDD/FD (Ortiz Campos, 2022).

⁴¹ Interfaz X2: Es la interfaz de señalización entre estaciones base NodeB o compatibles

⁴² IMS: IP Multimedia Subsystem

Figura 5.

Arquitectura 5G NSA



Fuente. (Ortiz Campos, 2022)

2.2 MultiAccess Edge Computing (MEC)

Edge Computing surge en 2013 como una alternativa de solución para hacer frente a los requisitos de transmisión de datos en entornos de telefonía móvil de la mano de IBM y Nokia Siemens Networks, para su operación es fundamental la intervención de estaciones base inalámbricas conocidas hoy en día como bordes de acceso, mismos que para la quinta generación de comunicaciones móviles se basan en tecnología RAN con el único fin de dar lugar a la continua comunicación entre dispositivos físicos y entornos lógicos a través de la red más grande del mundo denominada Internet, y a la vez dando estricto cumplimiento de los indicadores KPI⁴³ expuestos

⁴³ KPI: Key Performance

en la Tabla 1; la denominación de la tecnología emite a la vez su nivel y capacidad de operación, siendo “Edge” a razón de que el procesamiento se lleva a cabo en el borde o bordes de la red, es decir más cerca de la fuente de datos y ya no en el Core como sucede en las redes tradicionales, dejando así atrás los procesos centralizados que conllevan alta carga computacional, tráfico excesivo en la red y elevada tasa de respuesta para aplicaciones de usuarios, de esta forma a largo plazo es evidente una mejora en la escalabilidad y seguridad de la red ya que cada nodo está aislado y privado de los demás (Sittón Candanedo, 2020).

Tabla 1.

KPIs del sistema MEC según la definición del ETSI

Tipo de KPI	Detalles
KPIs funcionales (por servicio)	Continuidad del servicio, eficiencia energética, latencias de extremo a extremo y unidireccionales, rendimiento, tasa de pérdida, fluctuación, salida de paquetes en orden, QoS y MOS.
KPIs no funcionales	Ciclo de vida, tiempo de arranque, escalabilidad, flexibilidad, disponibilidad, tolerancia a fallas, carga de host MEC, número de solicitudes de API, solicitud de retraso y solicitudes fallidas.

Nota. Adaptado al idioma español de (Leppänen, 2019)

Bajo lo mencionado anteriormente se cita como ventaja más sobresaliente de la computación de borde al acceso en tiempo real al contenido local e información variada por parte de aplicaciones de software ya que esta estará disponible entre varios servicios gracias al almacenamiento en caché en el perímetro de la red y la convergencia entre telecomunicaciones y

Cloud TI⁴⁴, más aún con la implementación de la iniciativa MultiAccess Edge Computing – MEC perteneciente desde 2016 al Grupo de Especificación Industrial – ISG del Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones – ETSI cuyo propósito es establecer un entorno estandarizado que permita la integración óptima de servicios en red bajo plataformas perimetrales de acceso múltiple de múltiples proveedores para el almacenamiento de aplicaciones y servicios sobre los elementos de red móvil (ETSI, 2022).

2.2.1 Escenarios

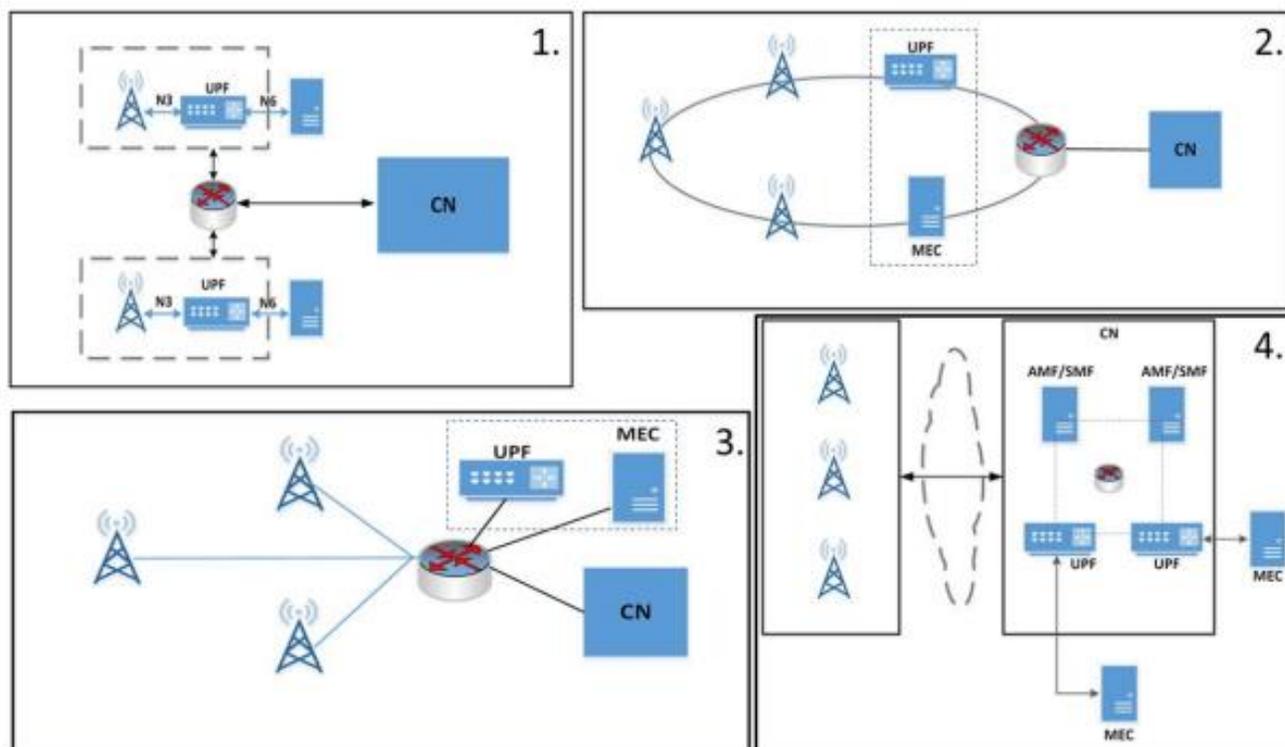
Los escenarios de comunicación MEC se enmarcan bajo distribución local para transmisión limitada y reducción de retraso, entre los principales se tiene: servicio de datos para aplicaciones de posicionamiento, redes vehiculares, y optimización de calidad de servicios QoS en servicios de streaming o videojuegos; para ello el punto clave es la ubicación de los elementos de redes MEC, principalmente los denominados MEC hosts, mismos que son implementados en la red de datos perimetral para el procesamiento y es el UPF o función de plano de usuario la encargada de direccionar el tráfico desde el plano de usuario hacia las aplicaciones MEC; en la Figura 6 se muestra una referencia de la ubicación física de los principales elementos que conforman la red multiacceso, se debe considerar esto como referencia ya que en el entorno real esta distribución depende del operador (CadenaSmartchainNova, 2020; Kekki et al., 2018); como se puede observar existen varias opciones de infraestructuras MEC: 1. Host MEC con su respectivo UPF dirigidos a una sola estación base, 2. Host MEC en anillo con varias estaciones base hacia la UPF local y un nodo de transmisión, 3. Host MEC y el UPF local colocados en conjunto sobre un punto de agregación en red y 4. Host MEC ubicados con un Core de funciones de usuario UPF (similar a un Data Center); esto la convierte en una tecnología de implementación flexible considerando el

⁴⁴ TI: Tecnologías de la Información

origen de los datos, las estaciones base y la red como tal; en todos los casos presentados la UPF es la encargada de direccionar el tráfico hacia las aplicaciones MEC específicas y hacia la red.

Figura 6.

Ejemplos de despliegue de elementos sobre escenarios MEC



Fuente. (Kekki et al., 2018)

2.2.2 Arquitectura

La arquitectura MEC esta estandarizada por el ETSI, de esta forma es posible conocer su función entorno a servicios y escenarios, para ello, como se muestra en la Figura 7 se requiere de la gestión de dos niveles, mismos que corresponden a usuario - Host Level Management y sistema - System Level Management, cada uno de ellos contempla etapas de tratamiento de la información en base a políticas y reglas implementadas vía software. El funcionamiento de dicho sistema se

basa en un grupo de servicios MEC para gestión de aplicaciones bajo plataformas que consisten en hosts MEC y ciclo de vida bajo orquestación; por parte de los hosts la gestión individual se realiza sobre una infraestructura de virtualización común, en donde cada host cuenta con tenencia múltiple, de esta forma, cada aplicación accede a los servicios prestados en el host.

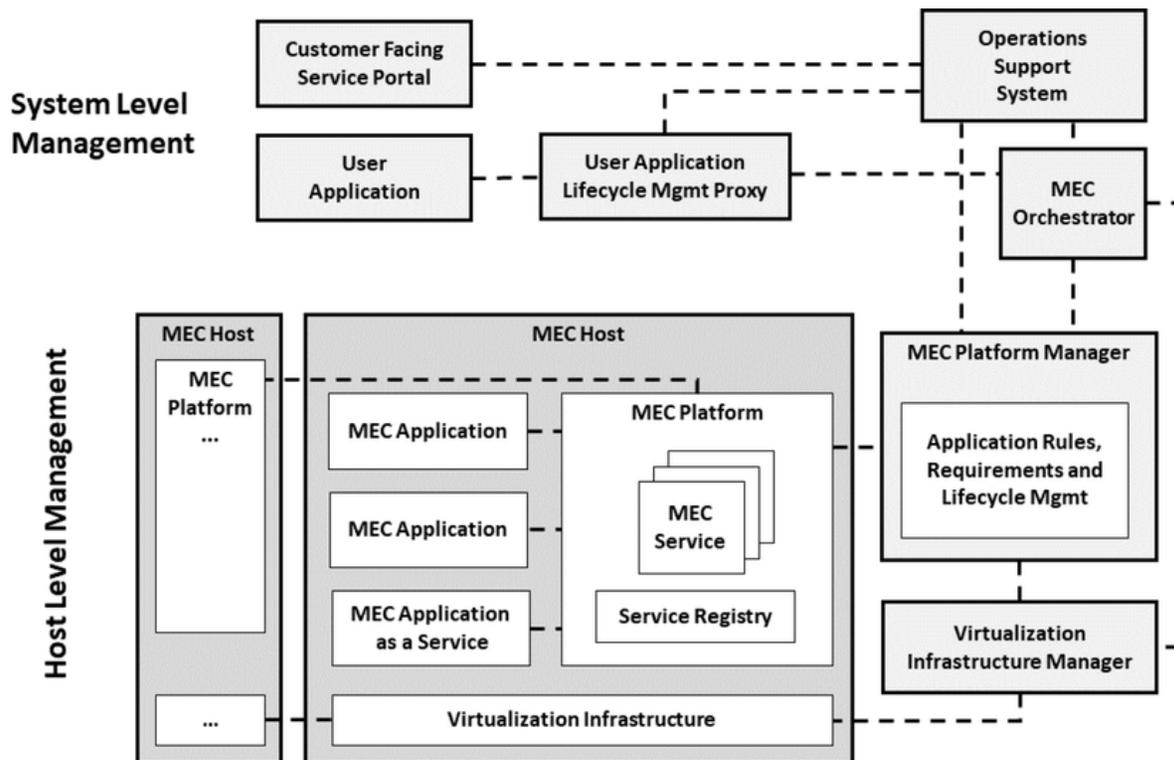
Por otro lado, tomando como referencia gráfica la Figura 7 se da a conocer a detalle el proceso de gestión MEC; en la plataforma las aplicaciones son iniciadas a partir de peticiones de usuario desde dispositivos móviles en lo que se denomina *User Application* (Aplicación de Usuario), a posterior se entabla una política de uso en base a contextos creados por los desarrolladores externos, estos contextos se autentican en *User Application Lifecycle Management Proxy* (Proxy de gestión de ciclo de vida de la aplicación de usuario) y una vez establecidos los paquetes de aplicación requeridos, el operador móvil se encarga de la integración del servicio en la red en *MEC Platform Manager* (Plataforma de administración MEC) tomando como base a información de sitios de acogida; para pasar al nivel de Host es fundamental la intervención del *MEC Orchestrator* (Orquestador MEC) con su *Operations Support System* (Sistema de soporte de aplicaciones) ya que en conjunto se encargan de la validación y ejecución de procesos en base a los contextos proporcionados, convirtiéndose así en la autoridad central para controlar la operación del sistema en base a tiempo y recursos tales como paquetes de carga y latencia de comunicación, de ser necesario este elemento ajusta las directrices para cumplir con los recursos del sistema y las políticas del operador, además selecciona los hosts para la aplicación e interviene con comandos para instanciar paquetes en la infraestructura virtualizada; durante la ejecución de la aplicación tanto el orquestador como el operador móvil pueden intervenir para la reubicación de host y proporcionar acceso a un posible cloud externo y servicios de red; la administración del sistema involucra la *MEC Platform Manager*, misma que controla el ciclo de vida de aplicaciones según

las instrucciones del orquestador y el operador móvil, logrando así resolver conflictos de recursos entre hosts en función del tráfico de información y el uso de servicios; mientras que la *Virtualization Infrastructure* (Infraestructura de virtualización) asigna recursos, es importante destacar que MEC admite multiusuario para el uso de múltiples aplicaciones y servicios dentro de un host, mismo que está en capacidad de proporcionar un registro de servicios para publicitar y acceder por plataforma.

Todo este proceso está enmarcado en el plano de datos de la infraestructura de virtualización, mismo que es controlado por la plataforma MEC para enrutar la aplicación y servicios de datos a través de redes locales y externas 3GPP. (Leppänen, 2019).

Figura 7.

Arquitectura de referencia ETSI ME



Fuente. (Leppänen, 2019)

2.2.3 Aporte a entornos inteligentes

Como se pudo apreciar en la sección anterior la gestión de datos en un sistema MEC cuenta con una característica altamente relevante, la cual es el tratamiento de la información lo más cerca posible de su origen, esto da paso a la disminución en la latencia al momento de compartir datos relevantes sobre aplicaciones de usuario, permitiendo así un mejor aprovechamiento de ancho de banda para que el dispositivo final pueda beneficiarse de la información lo más aproximado posible a tiempo real mediante aplicaciones que acceden a la plataforma de la red RAN, más aún bajo comunicación Full Dúplex; además de ello otro aporte sobresaliente de dicha tecnología es la distribución de la capacidad informática, lo que facilita la interconexión de un alto volumen de dispositivos finales, brindando así escalabilidad.

2.3 Comunicación Vehicular V2X

La tecnología de comunicación V2X consiste en un sistema o sistemas de comunicación que dan lugar al intercambio de información entre y con vehículos de forma inalámbrica, actuando cada uno como nodos de manera que se pueda conocer datos relevantes del vehículo, tales como su velocidad, ubicación, ruta, cantidad de combustible, entre otros; para una vez que se de tratamiento a toda esta información sea posible aportar en el desarrollo de la industria y la movilidad; para la definición de la comunicación dicho entorno se encuentra estandarizado bajo IEEE 802.11p, mismo que inicialmente fue diseñado para la comunicación Zigbee y Vehicular con orientación a IoT, a continuación en la Tabla 2, de acuerdo con (Caicedo Bastidas & Martínez Ojeda, 2011; Pascual Belda, 2019) se presenta los parámetros más relevantes de operatividad para el estándar(Pascual Belda, 2019), en donde la frecuencia de operación para el presente trabajo de grado se establece para comunicación vehículo a vehículo - V2V en 5.9 [GHz], mientras que para

la comunicación vehículo a red - V2N se define en 3.5 [GHz], para un respectivo un ancho de banda por canal de 10 [MHz].

Tabla 2.

Características de 802.11p

Parámetro	Valor
Velocidad de transmisión Mbps	3, 4, 5, 6, 9, 12, 18, 24 y 27
Modulación	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Tasa de codificación	1/2, 1/3, 3/4
Numero de subportadoras	52 [=48 (datos)+4 (portadoras piloto para supervisión de desfases de rutas e interferencia inter carrier)]
Longitud de símbolo OFDM	8 [useg]
Tiempo de guarda	1.6 [useg]
Periodo FFT	6.4 [useg]
Duración del preámbulo	32 [useg]
Frecuencia	5.850 a 5.925 [GHz]
Ancho de banda utilizado	70 [MHz]
Espaciamiento en frecuencia de subportadoras	0.15625 [MHz]
Fase de ejecución capa MAC	No identificación, No autenticación
Numero de canales	7
Ancho de banda por canal	10 [MHz]

Fuente. (Caicedo Bastidas & Martínez Ojeda, 2011)

2.3.1 Comunicaciones V2V y V2N

Una red vehicular engloba algunos tipos de comunicaciones, fundamentalmente para este proyecto se da a conocer de forma general las principales, mismas que se consideran entre vehículos V2V y de vehículo a red o V2N.

- Comunicación Vehículo a Vehículo (V2V): Este tipo de comunicación se ejecuta a manera de AD-HOC⁴⁵ entre vehículos, permitiendo que cada uno se convierta en un nodo para así intercambiar información relevante con sus similares, esta puede ser referente al estado vial, alerta de accidentes, alerta de construcciones en proceso, alerta de condiciones de tráfico u otras condiciones susceptibles mediante sensores dedicados.
- Comunicación Vehículo a Red (V2N): Este tipo de comunicación se ejecuta entre los nodos vehiculares y las estaciones base situadas en puntos estratégicos de la carretera, denominadas para efecto de convergencia con tecnología 5G gNodeB o eNodeB en caso de depender de una infraestructura LTE 4G , de esta forma se captura la información relevante acerca del entorno para un posterior tratamiento de la misma e intercambio de datos con redes externas, principalmente internet; también la difusión de la información puede realizarse de forma interna bajo comunicación entre infraestructuras en la denominada I2I (Sánchez, 2017).

En conjunto con las comunicaciones V2V y V2N, los sistemas de comunicación también dependen de otros tipos de comunicación, tales como V2P que involucra vehículo – peatón y V2I

⁴⁵ AD – HOC: Red de comunicación no centralizada en donde no hay dependencia de infraestructura preexistente, por ello cada host participa en la orientación de datos hacia un destino.

vehículo – infraestructura, las cuales se emplean de acuerdo con el objetivo del servicio; en la Tabla 3 se da a conocer los casos de uso de estas y su rango de alcance, mismo que se define cualitativamente como corto para < 200 metros, medio de 200 – 500 metros y largo > 500 metros.

Tabla 3.

Casos de uso V2X

Tipo de aplicaciones	Modo V2X	Latencia (EndtoEnd)	Confiabilidad	Tx/vehículo [kbps]	Rango de comunicación
Conciencia Cooperativa	V2V-V2I	100[ms] – 1[s]	90 – 95 %	5 – 96	Corto a Medio
Detección Cooperativa	V2V-V2I	3[ms] – 1[s]	>95%	5 – 25000	Corto
Maniobra Cooperativa	V2V-V2I	<3[ms] – 100[ms]	>99%	10 – 5000	Corto a Medio
Usuario vulnerable en carretera	V2P	100[ms] – 1[s]	95%	5 – 10	Corto
Eficiencia de tráfico	V2N-V2I	>1[s]	<90%	10 – 2000	Largo
Conducción Teleoperada	V2N	5[ms] – 20[ms]	>99%	>25000	Largo

Nota. Adaptado al idioma español de (Raza et al., 2018)

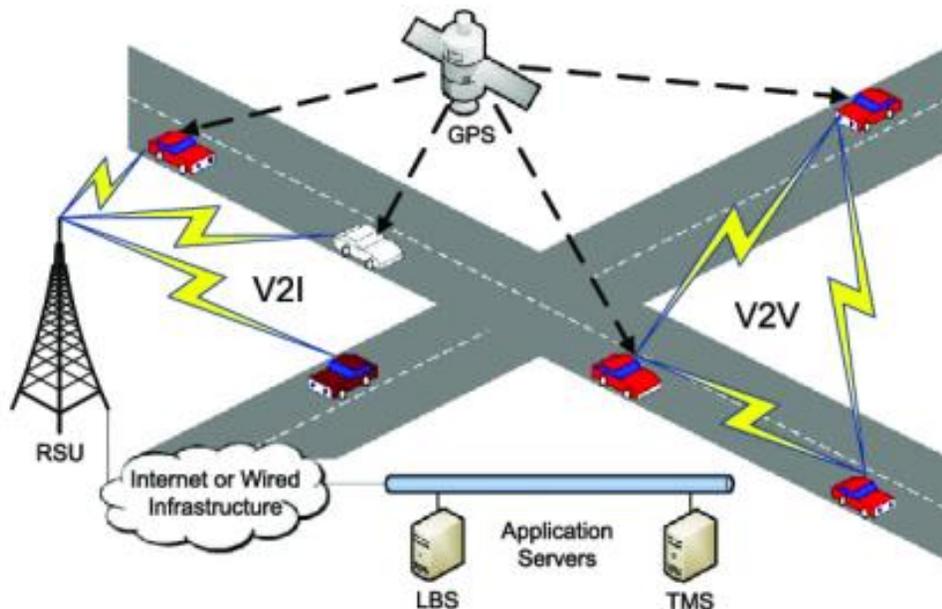
2.3.2 *Arquitectura*

La arquitectura de un sistema V2X como se lo conoce globalmente es como tal un sistema cooperativo ya que depende de la interacción de varios elementos para ejecutar los distintos tipos de comunicaciones especificados anteriormente y expuestas en la Figura 8 a través de un ejemplo concreto; estos enlaces dependen de una infraestructura específica conformada como primera etapa por RSUs⁴⁶ y NodeB para redes móviles avanzadas, estos elementos se ubica en lugares fijos estratégicos de la carretera para brindar cobertura a una determina zona y servir como intermedio de comunicación entre los vehículos y el centro de servicios para intercambiar información relevante de movilidad y estado vial; por otro lado, las OBU⁴⁷ son unidades incorporadas en los vehículos que se encargan de ejecutar la comunicación con otros vehículos o con infraestructuras mediante la red inalámbrica definida, estas unidades también se comunican con el resto de elementos del vehículo mediante el bus CAN⁴⁸, protocolo que permite la comunicación entre microcontroladores y dispositivos del vehículo, de esta forma aporta en gran medida a servicios de sistemas avanzados de ayuda de conducción, mejor conocidos como ADAS (Comesaña Hermida, 2022).

⁴⁶ RSUs: Road Side Units

⁴⁷ OBU: On Board Units

⁴⁸ CAN: Controllor Area Network

Figura 8.*Ejemplo de comunicación V2X**Fuente. (Moscardó García, 2021)*

2.4 Ciudades Inteligentes

El término “Ciudad Inteligente” o “Smart City” es muy usado hoy en día para describir a una localidad tal como un distrito o una ciudad en donde se ha implementado tecnología e innovación para la digitalización de medios con el fin de propiciar el desarrollo de la principal tendencia del siglo XXI que es la urbanización a través de la movilidad, de esta forma se logra mejorar la calidad de vida de la población poniendo a disposición un ecosistema próspero y sostenible con ciudadanos empoderados y comprometidos; estas mejoras son posibles a partir de una gestión adecuada por parte de la administración pública mediante la correcta planificación de ámbitos bajo una cultura organizacional, trabajadores calificados y la inclusión ciudadana ya que las ciudades están formadas por la gente y no solo la tecnología, esta última es solo una herramienta

de gestión y administración que permite alcanzar desafíos y cimentar las bases de infraestructura digital, análisis/gestión de datos, gobernanza y financiación inteligente para así lograr un ecosistema inteligente (UNDP, 2022).

2.4.1 Características

Para que una ciudad sea catalogada como inteligente es necesario que dentro de sus proyectos administrativos se mantengan objetivos de desarrollo social, económico y medioambiente bajo sostenibilidad y sustentabilidad con apoyo en las TICs⁴⁹; para ello se requiere inversiones progresivas de capital humano, enfoques sociales e infraestructuras de energía, transporte y comunicación; mismos que a largo plazo dan lugar a la implementación de características de tipo Smart City, las cuales se consideran de forma general y como relevantes a control y automatización de edificaciones, planificación urbana óptima, movilidad urbana eficaz, transporte público sostenible y organizado, gestión inteligente de residuos, priorización del entorno social, transparencia en la gobernación y ciudadanía, sostenibilidad ambiental, tecnologías aplicadas a la educación y salud; todo en conjunto está en capacidad de generar soluciones inteligentes bajo integración de la tecnología para el control de tráfico sobre redes locales, regionales y mundiales tales como internet (Celis Lima, 2021).

2.4.2 Elementos clave que definen una ciudad inteligente

Como se mencionó en apartados anteriores la estructuración de una ciudad inteligente conlleva la participación de la innovación y la tecnología en distintos ambientes de desarrollo esto permite fomentar una cultura inteligente de alto nivel a la vez que construir un distrito más organizado tanto social como económicamente; cada ambiente constitutivo de una ciudad cuenta

⁴⁹ TICs: Tecnologías de la información y comunicación

con elementos organizacionales que permiten su operación dentro del sistema social, es por ello que a continuación se da a conocer de forma concreta los principales enfoques que se ven positivamente afectados con la implementación de una propuesta inteligente en el desarrollo del transporte público urbano, así como su participación como pieza clave en un entorno Smart.

2.4.2.1 Movilidad Inteligente

Movilidad Inteligente o Smart Mobility es un concepto de vital importancia en la implementación de una Smart City ya que mantiene objetivos concretos que conllevan la reducción de la contaminación ambiental y acústica, disminución de congestión vehicular, mejora en la seguridad ciudadana y optimización de desplazamiento vehicular en cuestión de tiempo – costo; para lograr una adecuada administración urbana es necesario contar con infraestructuras tecnológicas de vanguardia que permita transmitir la información de tráfico en tiempo real para que la administración pública pueda realizar la gestión simultánea, para ello es fundamental la participación de V2X para la interconexión y sincronización del ecosistema vehicular (Valentín Rojas, 2021), a continuación se da a conocer un caso relevante de aplicabilidad en cuanto a transporte público urbano y su estrecha relación con paradas inteligentes con el fin de fortalecer el enfoque del presente estudio.

El sistema de transporte urbano es considerado un eje fundamental de desarrollo de una ciudad ya que una gran parte de la población depende de este recurso para su movilidad, en distintas partes del mundo dichos automotores están diseñados para albergar alrededor de treinta personas considerados pasajeros, mismos que pueden hacer uso del medio desde paradas establecidas por la administración local, estas paradas hasta hace solo unos años eran espacios comunes marcados, pero debido a la necesidad de desarrollo urbano bajo innovación tecnológica, en varias partes del planeta dichos puntos se han convertido en auténticas zonas futuristas

edificadas bajo complejos sistemas de comunicación que permiten a los usuarios conocer el estado de las rutas y los autobuses en tiempo real entorno a un mapa definido de la zona, además de ello es posible acceder a conectividad a internet mediante WiFi e incluso a puntos de carga para dispositivos móviles, como ejemplo de ello en la Figura 9 se muestra un caso de implementación; hoy en día en una era donde el cuidado del medio ambiente es fundamental se han desarrollado sistemas híbridos y ecológicos para operación de las zonas mencionadas, estas usan energías alternativas lo que aporta en gran medida al cuidado del medio ambiente (ZICLA, 2017).

Figura 9.

Ejemplo de transporte público urbano y parada inteligente en el paseo de Gracia – Barcelona – España



Fuente. (Espinosa, 2015)

Todo el sistema que da lugar a la organización urbana mediante paradas inteligentes beneficia a la población y promueve la cultura ordenada, a la vez que abre las puertas a distintos mercados tecnológicos para que estos se conviertan en proveedores de dispositivos de acceso y transporte que permitan sacarle el mayor provecho a la red de comunicaciones.

2.4.2.2 Medioambiente inteligente

Este aspecto consiste en una apuesta de las Smart Cities por la innovación y la sostenibilidad, cuyo principal objetivo es la reducción de la contaminación, manejo óptimo de residuos, uso de energías alternativas y la gestión responsable de recursos naturales como el agua y el aire para lo cual se pretende reducir las emisiones de dióxido de carbono o CO₂ y por consiguiente controlar la cantidad de gases de efecto invernadero, para ello es fundamental la correcta participación de la movilidad urbana mediante el uso responsable de tecnologías sobre infraestructuras dedicadas (eSMARTCITY.es, 2022)

2.4.2.3 Gobiernos inteligentes

Este elemento tiene como objetivo la mejora de servicios y la relación del gobierno con sus ciudadanos afrontando retos crecientes asociados a aspectos tecnológicos relacionados con la gestión o sostenibilidad de infraestructuras tecnológicas bajo políticas de innovación, para ello el propósito de la entidad debe estar centrado en optimizar y mantener transparente la gestión organizacional y entrega de servicios, promover la colaboración entre departamentos del distrito con otros internos y externos bajo un enfoque con visión de futuro para el uso de integración de la información, la innovación y la tecnología (Maestre Góngora & Nieto Bernal, 2015).

2.5 Simuladores utilizados para entornos inalámbricos

En este apartado se da a conocer la gama de simuladores que se consideran como opción para llevar a cabo el estudio planteado, dicha selección de softwares está basada en las directrices definidas por el estándar internacional ISO/IEC/IEEE 29148 el cual describe el proceso de ingeniería de requisitos, ya que más allá de seleccionar una adecuada metodología de estudio es necesario establecer un software para pruebas, mismo que debe contar con calidad para ejecución de buenas prácticas, para ello en primera instancia se realiza la identificación de requisitos del

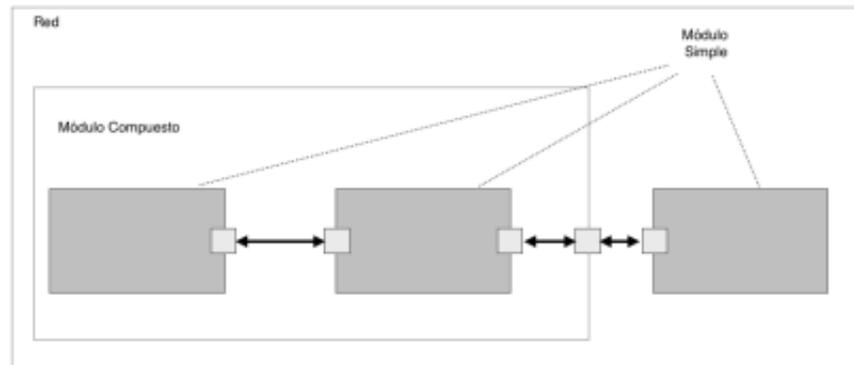
sistema a probar para a partir de eso determinar las funcionalidades que la aplicación debe poseer y bajo qué condiciones se deben instaurar, identificando también posibles fallas o limitantes; para lograr de forma exitosa una adecuada ingeniería de requisitos se debe comprender las necesidades, documentar los requerimientos y validar los mismos con el fin de obtener resultados óptimos en base a indicadores de desarrollo como costo, tiempo y calidad (ISO/IEC, 2018; Torres Samuel, 2020).

Existen en el mercado algunos simuladores de red para entornos inalámbricos, entre los principales se tiene: Omnet++, Sumo, Veins, NS3 y Opnet; los cuales se describen en los apartados siguientes.

2.5.1 OMNET++

Omnet++ es un simulador de eventos discretos orientado a objetos y basado en Eclipse que da soporte al código fuente C++, incluye la capacidad de introducir y configurar modelos de red (archivos .ned y .ini), permitiendo así capturar secuencias de transmisión y analizar resultados por medio de distintos tipos de diagramas.

Este simulador es usado para múltiples soluciones en redes como: modelado de redes alámbricas e inalámbricas, modelado de protocolos, multiprocesadores y sistemas de hardware distribuido, validación de arquitectura de hardware, entre otros. Las entidades usadas para la creación de simulaciones se muestran en la Figura 10 y se conocen como módulos simples que en conjunto forman módulos compuestos, los cuales son configurables y reusables en diferentes tipos de combinaciones gracias a su programación en C++ y haciendo uso de librerías, todo esto dependiendo de la necesidad de la red, estos módulos se interconectan vía puertas de conexión o gates que permiten el transporte e intercambio de datos en diferentes estructuras (OMNeT++, 2022)

Figura 10.*Módulos simples y compuestos*

Fuente. (Zambrano Martínez, 2015)

A continuación, se detallan las principales características del simulador Omnet++:

- **Parametrización:** Permite la asignación de variables a cada módulo, son asignadas tanto en los archivos de descripción de red .ned y los archivos de configuración de simulación omnetpp.ini, estos valores pueden ser de cualquier formato o contener una estructura .xml
- **Lenguaje NED:** Significa Network Description, que permite al usuario declarar, conectar y ensamblar módulos simples para generar módulos compuestos o redes, las conexiones se pueden realizar desde una interfaz gráfica o con lenguaje programación en los archivos source.
- **Archivos .ini .cc .h:** Los archivos .ini parametrizan el modelo de simulación definiendo así el resultado a esperar en la ejecución, por otro lado, los archivos .cc y .h permiten acceder a la configuración lógica de los módulos, es decir establecer cómo va a funcionar la red (Intriago Cobeña, 2018).

Este simulador actualmente pone a disposición su última versión 6.0 junto con versiones preliminares beta y estables, además es compatible para sistemas operativos Windows, Linux y MAC OS, además de Docker⁵⁰; sus versiones se encuentran disponibles en su página oficial y no demanda de gran cantidad de recursos de hardware y software para su ejecución únicamente es necesario contar con una previa instalación del paquete Java Runtime Environment JRE.

2.5.1.1 VEINS

Veins es un paquete de software de código abierto basado en el simulador de eventos Omnet++ y el simulador de tráfico SUMO, que permite ejecutar simulaciones de redes vehiculares en base a un conjunto completo de modelos y complementos. A continuación, se describen sus principales características de acuerdo con su sitio web oficial (veins, 2022).

- Extensibilidad sin restricciones a razón de código abierto al 100%.
- Reconfiguración y redireccionamiento en línea de vehículos acorde a paquetes de red.
- Basado en modelo de movilidad vehicular confiable.
- Basado en modelos en capas de red IEEE 802.11p e IEEE 1609.4 DSRC/WAVE⁵¹, incluyendo valores de operación multicanal, QoS, ruido e interferencia.
- Compatible con el marco INET para inclusión de modelos de terceros, tales como ETSI ITS-G5, redes móviles 4G/5G como 3GPP y C-V2X, además de VLC o comunicación por luz visible.
- Permite ejecutar simulaciones en tiempo real a nivel de ciudad desde una misma estación de trabajo mediante la importación de escenarios completos desde OpenStreetMap incluyendo edificaciones, carriles, semáforos, sombras, entre otros.

⁵⁰ Docker: Tecnología de organización de contenedores con base en el sistema operativo Linux.

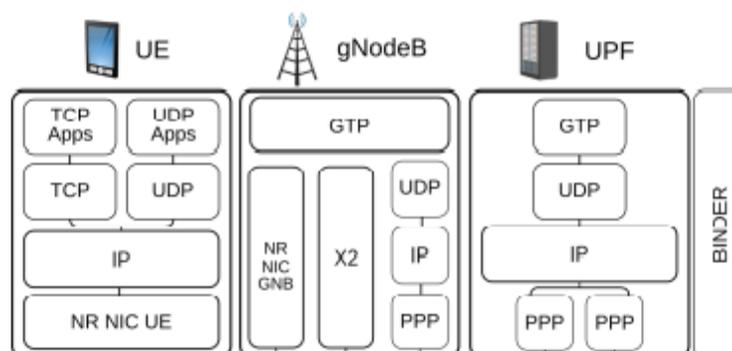
⁵¹ DSRC/WAVE: Dedicated Short Range Communication / Wireless Access in Vehicular Environments

2.5.1.2 Simu5G

Simu5g es un simulador basado en el marco de Omnet++ y escrito en C++ que permite evaluar entornos 5G New Radio a la vez que desarrollar nuevos módulos implementando algoritmos y protocolos, debido a estas características posee una estructura de fácil entendimiento e incluso permite integrar características INET, soporta herramientas de optimización como CPLEX, es compatible con SimuLTE y con bibliotecas basadas en Omnet++ como VEINS por ejemplo lo que lo vuelve un simulador completo (SIMU5G, 2022), sus principales módulos disponibles se muestran en la Figura 11.

Figura 11.

Principales módulos disponibles en paquete Simu5G



Fuente. (Noferi et al., n.d.)

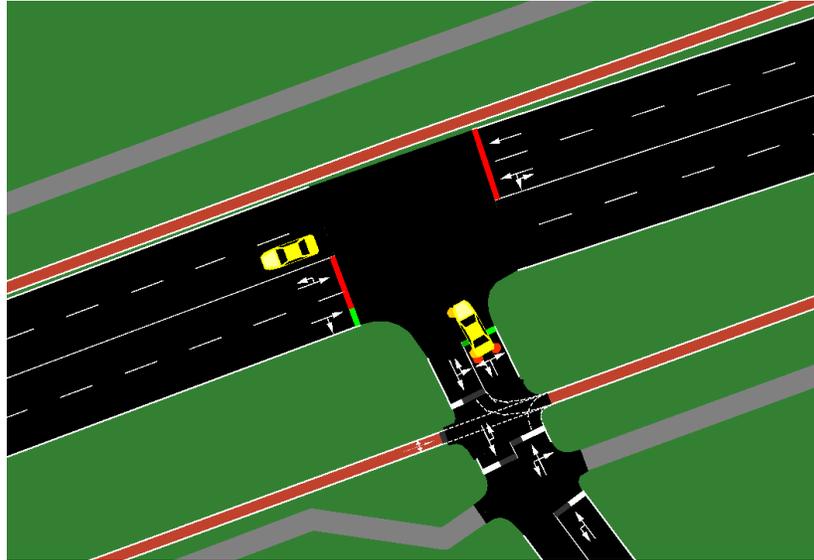
2.5.2 SUMO

Simulation of Urban Mobility (SUMO) permite crear escenarios de simulación de redes de comunicación en entornos de tráfico vial mediante el uso de varios módulos, este simulador cuenta con licencia EPL 2.0 y es de código abierto siendo su principal función el modelado vehicular y

de rutas (sumo.dlr.de, 2022), ya que está basado en C++ funciona como un complemento directo de Omnet++ en versiones compatibles, como ejemplo de simulación se muestra la Figura 12.

Figura 12.

Ejemplo de simulación en SUMO



Fuente. (programadorclick.com, 2022)

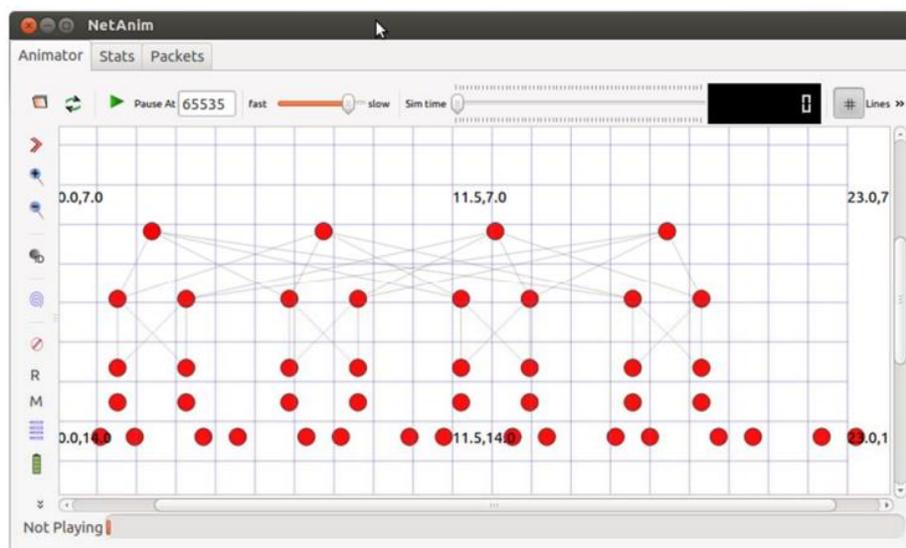
2.5.3 NS3

NS3 es un simulador de redes de comunicación bajo eventos discretos compatible con plataformas Linux, MacOS Apple LLVM y FreeBSD que permite ejecutar pruebas a partir de scripts escritos en C++ o Python, su principal característica es que es un software libre que posee licencia GNU GPLv2, lo que le permite contribuir la investigación moderna de redes; en conjunto su estructura contribuye a un núcleo de simulación sólido fácil de usar y depurar, dando paso a un trabajo de simulación y análisis organizado; además su infraestructura se basa en modelos realistas lo que lo convierte en un emulador ya que mediante ello es posible la interacción con máquinas virtuales, su núcleo de simulación admite redes basadas en IP y no IP con enfoque a simulaciones

de entornos inalámbricos, siendo LTE su más alta categoría, además de una gran variedad de protocolos de enrutamiento estáticos y dinámicos como OLSR⁵² y AODV⁵³ para aplicaciones basadas en IP (NSNAM, 2022), su referencia grafica de operación de muestra en la Figura 13.

Figura 13.

Ejemplo de simulación sobre NS-3



Nota. Adaptado de Animación de topología Fat-tree en NetAnim (Lucas Jurado, 2015)

2.5.4 OPNET

Optimized Network Engineering Tools – OPNET es un simulador cuyo soporte corresponde a la empresa estadounidense de tecnología Riverbed, este simulador permite evaluar redes de una forma potente y versátil proporcionando modelos prediseñados de protocolos y dispositivos, permitiendo así evaluar diferentes topologías de red, dichos modelos son fijos por lo tanto no se puede crear nuevos o modificar los existentes; su principal ventaja radica en que es de

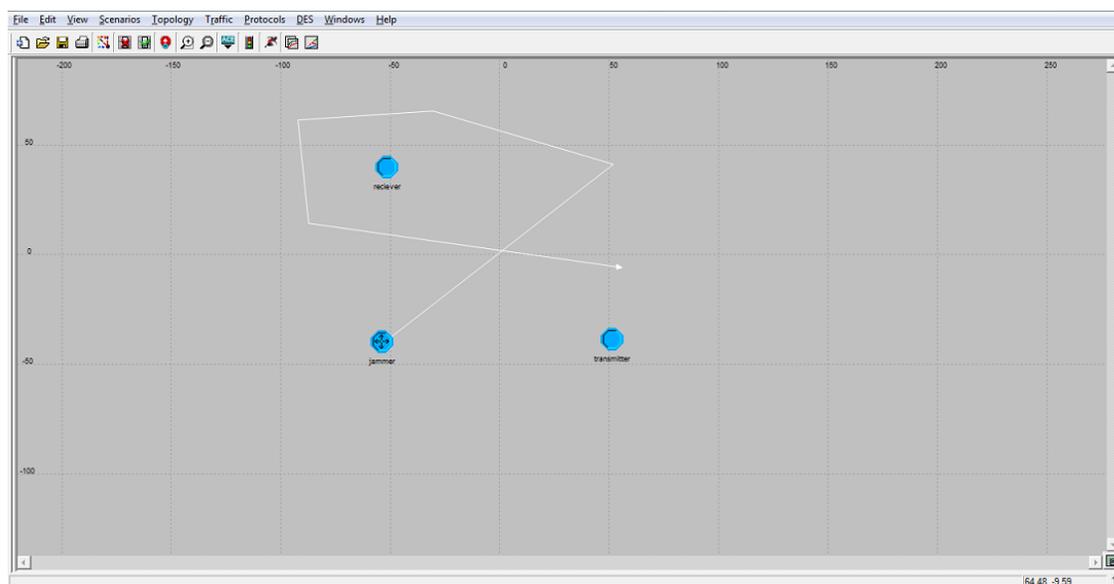
⁵² OLSR: Optimized Link State Routing

⁵³ AODV: Ad-Hoc on Demand Distance Vector

código abierto y pone a disposición de usuarios finales un gran número de escenarios tales como: validación operativa, solución de problemas de aplicaciones, planificación y diseño de redes, validación de la arquitectura de hardware, modelado de protocolos, modelización de tráfico de redes de telecomunicaciones, evaluación de aspectos de rendimiento de sistemas de software complejos logrando así aportar a la investigación en el campo de las telecomunicaciones; es importante destacar que dicho simulador a día de hoy se encuentra sin soporte en su versión de uso académico, únicamente está disponible su versión Riverbed Modeler v.18.10.0 para uso empresarial con su última actualización en fecha 13 de mayo de 2022, este requiere un identificador de producto para poderse descargar y ejecutar (OPNET, 2022), como referencia de operación a continuación se muestra la Figura 14 en donde se ejecuta un ejemplo simple de comunicación entre dispositivos en red.

Figura 14.

Ejemplo de simulación en OPNET Modeler



Fuente. (OPNET, 2022)

Una vez descritos de forma general los simuladores de red disponibles con características relacionadas al desarrollo de este proyecto, a continuación en la Tabla 4 se muestra una comparativa de los mismos para de esta forma en una sección posterior dar uso al más adecuado de acuerdo con sus funciones.

Tabla 4.

Comparativa de simuladores de red utilizados para entornos inalámbricos

Simulador / Características	OMNET++	NS3	OPNET Modeler (Academy)
Lenguaje de programación	C++ extensible	C++ o Python	Proto-C
Base de ejecución de paquetes	Eventos discretos	Eventos discretos	Eventos discretos (OPNET Modeler)
Última versión disponible	OMNET++ 6.1	NS-3.35	OPNET Modeler 18.10.0
Plataformas compatibles	Windows, Linux, MacOS, Core	Linux, MacOS Apple LLVM, FreeBSD	Windows, Linux
Costo de adquisición	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Disponibilidad de modelos prediseñados y modificables	Modelos prediseñados y modificables	Modelos prediseñados y modificables	Modelos prediseñados, pero no modificables

Simulación de redes inalámbricas	SI	SI	SI
Simulación de redes MEC – 5G	SI, mediante paquetes INET y Simu5G	NO, solo 5G	NO, solo 5G
Simulación de movilidad vehicular	SI, mediante VEINS y SUMO	NO	NO
Soporte a día de hoy	Disponible	Disponible	No disponible (Solo versión empresarial)

2.6 Trabajos relacionados

Con el fin de mantener el enfoque de investigación del presente trabajo se toma en consideración trabajos relacionados, mismos que fortalecen los conceptos de aplicación de las tecnologías mencionadas sobre infraestructuras en ciudades e industrias inteligentes.

En primer lugar se considera a *“The 5G MEC Applications in Smart Manufacturing”* presenta la primera implementación pre-commercial en Jabil/Wuxi/China para manejar tareas de fabricación inteligente de elementos para industrias de computación y almacenamiento, mediante el aprovechamiento de las capacidades TI en el borde de la red bajo la tecnología conocida como MEC, la cual tiene un aporte de gran relevancia en redes 5G Stand Alone (NS) y Non Stand Alone (NSA) para el procesamiento de información en tiempo real en conjunto con redes definidas por software (SDN) y virtualización de funciones de red (NFV), generando así una comunicación con baja latencia a la vez que una infraestructura flexible y escalable, para ello se resalta la comparativa con las redes 4G en donde la latencia RTT en transmisión ida y vuelta es de 40 a 50 [ms], mientras que para 5G supone una enorme mejora en especial en la última milla con una latencia de 10 [ms]

y de 0.5 [ms] para comunicación de baja latencia ultra confiable (URLLC), las cuales se complementan con la latencia del backhaul; para un mejor aprovechamiento de la infraestructura es fundamental considerar la experiencia de usuario y el óptimo uso de recursos más aun con la exponencial implementación de IoT; por otro lado también se destaca el actuar de MEC 5G en la industria tomando como punto de partida la problemática por limitaciones de comunicación entre sistemas de producción mediante la red inalámbrica WiFi, la cual no es la mejor solución para aplicaciones de movilidad ya que los datos provenientes de diferentes tecnologías están fragmentados lo que dificulta asegurar la convergencia, para ello se propone una arquitectura de comunicación MEC dividida en dominios de telecomunicaciones (cobertura 5G) y aplicación (plataforma basada en Kubernetes) interconectados por la capa de red (Mu et al., 2020).

Como siguiente trabajo considerado como relacionado al estudio planteado se cita a *“Impact of the MEC location in transport networks on the capacity of 5G to support V2X services”*, mismo que muestra un estudio de las tecnologías mencionadas en esta investigación en cuanto a la demanda de capacidad de enlace que genera el soporte de servicios avanzados vehiculares con tecnología V2X sobre redes de transporte 5G independiente Stand Alone-SA con infraestructura propia y dependientes Non Stand Alone-NSA que implican la evolución gradual de 4G y Evolved Packet Core (EPC) para su implementación bajo una alta tasa de tráfico; los mencionados servicios avanzados operan bajo la instalación de plataformas de acceso múltiple móvil (MEC) en el borde de la red con el fin de reducir la latencia al llevar a cabo el procesamiento de los datos con recursos informáticos del perímetro de la red, además el documento evalúa los requerimientos de procesamiento necesarios para instalar servidores de aplicaciones V2X en los nodos MEC, lo que conlleva a un desafío en redes 5G NSA, mientras que en redes 5G SA

requerirán capacidades de enlace no depreciables y una potencia informática y de procesamiento MEC significativa (Coll-Perales et al., 2021).

Finalmente, en dicha propuesta se considera como base de estudio local y trabajo relacionado de alta relevancia a “*Modelación y simulación de control de tráfico vehicular en horas pico para el centro de la ciudad de Ibarra, a través de una red AD-HOC VANET*”, este muestra un caso de estudio llevado a cabo en la ciudad de Ibarra – Ecuador partiendo de la problemática alto crecimiento vehicular en los últimos 10 años a razón del incremento de poder adquisitivo en los ciudadanos de la localidad, lo que conlleva a mayor afluencia vehicular en zonas urbanas de la ciudad, especialmente en horas pico, para ello se propone una solución basada en tecnología vehicular, misma que a través de una red AD-HOC VANET permitirá a los conductores conocer el estado vial lo que contribuye a balancear el sistema de movilidad; esta propuesta se sustenta mediante un entorno de simulación de rutas de automóviles sobre el circuito vial urbano de la ciudad bajo el estándar de comunicación IEEE 802.11p, para ello se hace uso de los softwares de simulación OMNET++ con módulos de VEINS y INET para la elaboración de la red de comunicación que transportara datos generados por tráfico vehicular estructurado sobre SUMO (Marcillo del Castillo, 2020).

Una vez analizados estudios previos con estrecha relación a este trabajo de grado, se hace hincapié en el propósito del mismo que es generar una propuesta de infraestructura con base en 5G NSA y MEC para de esta forma aprovechar la infraestructura 4G existente en Ecuador y poder transmitir datos de vital importancia de los cuales la ciudadanía podrá beneficiarse en tiempo real en el servicio de actualización de rutas de autobuses de transporte público en la ciudad de Ibarra, para ello se toma en consideración el sistema propuesto en el primer trabajo relacionado, mismo que condiciona la gestión de la red en función a dominios de telecomunicaciones y aplicación

interconectados mediante al capa de red por interfaces dedicadas, tales como N3 (BBU - UPF), N4 (UPF – 5GC) para el plano de control, y N6 para envío de datos en el plano de usuario, esta última interfaz está aislada de otras y se encuentra con direcciones IP planificadas y administradas únicamente por el departamento de TI; todo en conjunto se gestiona mediante un servicio basado en plataforma (PaaS), además para lograr un sistema óptimo de flujo de datos se considera la idea central del segundo trabajo relacionado que consiste en una arquitectura de red planteada por la comisión de estudio de la UIT-T, misma que opera en jerarquía sobre segmentos de acceso y agregación conocidos como metro-edge y metro-aggregation bajo especificaciones técnicas, todo en conjunto será evaluado para la localidad mencionada considerando las rutas de transporte sobre las vías de alta afluencia en donde los vehículos estarán en capacidad de transmitir datos de estado del entorno, para ello se considera el tercer trabajo estrechamente relacionado ya que al igual que esta propuesta su sustento se lleva a cabo sobre un entorno simulado debido a que no se cuenta en el país con tecnología 5G y MEC.

3 CAPITULO III: ESTABLECIMIENTO DE REQUERIMIENTOS Y DISEÑO DEL PROYECTO

Como tercer capítulo, se da a conocer el estudio previo de los recursos que se utilizarán para el diseño y simulación del sistema de comunicación propuesto. Para ello, se establece como metodología de gestión el Modelo en Cascada, con el fin de lograr una estructura secuencial y organizada del proceso de tal forma que cada fase del proyecto sirva como hipótesis para la siguiente.

3.1 Antecedentes y Situación actual

La infraestructura de paradas interactivas implementada en la ciudad de Ibarra - Ecuador, a la presente fecha (enero 2023) se encuentra bajo administración pública por parte de la empresa de movilidad del norte denominada Movidelnor E.P. desde el año 2018, ya que previamente en sus inicios a partir del año 2015 estuvo en manos de las cooperativas de transporte público "28 de Septiembre" y "San Miguel de Ibarra", dirigidas por sus respectivos presidentes, dicho proyecto tomó como iniciativa la innovación para beneficio de la comunidad; de acuerdo a fuentes oficiales, tales como el informe Nro. EPM-DPP-2021-000-21 emitido por MOVIDELNOR E.P que detalla la estructura y operación del proyecto mencionado, publicaciones en sitios oficiales del GAD Municipal de la ciudad de Ibarra (GADIbarra, 2022) que permiten la identificación de las rutas oficiales de los autobuses y la prensa (DiarioELNORTE, 2021; LAHORA, 2021), que en su momento emitió detalles de operación, ubicación y expectativa del proyecto; se conocen los valores de fabricación e instalación de cada una de las paradas, así como el diseño y operación de su red; los cuales en conjunto formaron parte de un salto tecnológico pasajero que no ha tenido continuidad debido a los cambios en la administración pública.

Los factores internos y externos que tienen un impacto en la productividad del proyecto están directamente relacionados con el objetivo orientado a la difusión de información establecido por Movidelnor E.P. en cumplimiento con la normativa vigente de Tránsito, Transporte y Seguridad vial. En este contexto, es relevante mencionar el ciclo productivo de un equipo electrónico, ya que estos son diseñados bajo especificaciones de compatibilidad que desgastan sus componentes de hardware o software, manteniendo así el ciclo de flujo de mercado para que de esta forma la empresa se vea obligada a adquirir un nuevo equipo con las mismas o mejores prestaciones; bajo este contexto, se presentan los elementos que forman parte de la arquitectura física de la red de comunicación de las paradas interactivas, así como la arquitectura de red.

La red de comunicación se encuentra conformada por los siguientes equipos de capa 3 con la interconexión de dispositivos finales.

- Routers Industriales AR550C-2C6GE Huawei
- Switch Core S5720-26C-EI-28S Huawei
- Servidor RH1288v5 Huawei con aplicación eSight para administración y monitoreo

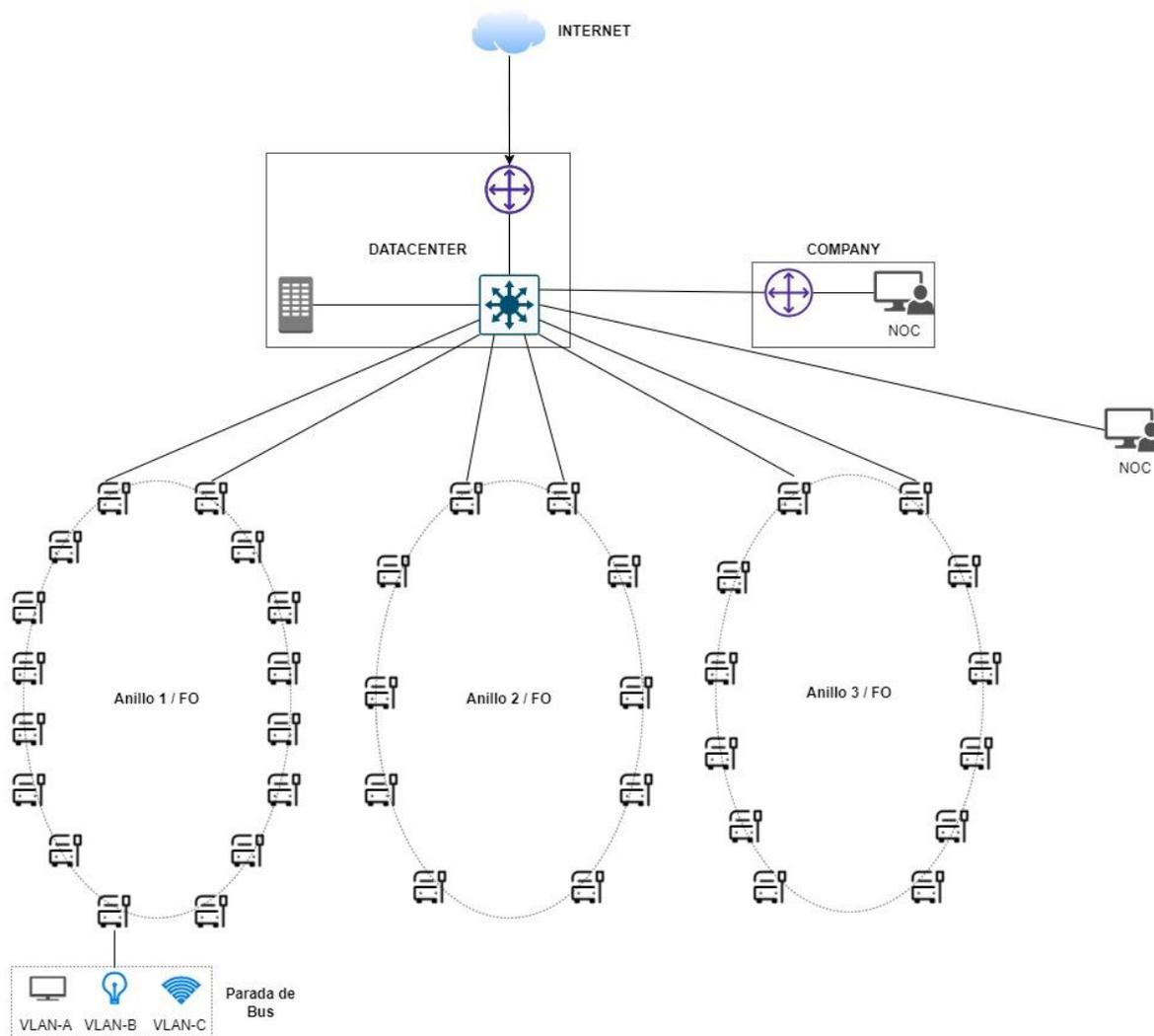
De acuerdo con el informe Nro. EPM-DPP-2021-000-21 emitido por la empresa pública Movidelnor E.P., se establece la operatividad de la red con los equipos mencionados, formando así 3 subredes a partir de la red maestra 127.17.0.0/17, mismas que según el RFC 5735 (Cotton & Vegoda, 2010), está dentro del bloque 127.0.0.0/8, que se determina para uso especial de bucle invertido para pruebas de diagnóstico de conexión en red bajo enlaces entre un transmisor y un receptor, es decir no tiene salida a Internet, ya que se determina un host con esta función para la difusión de información; en dicho proyecto la distribución IPv4 se usa para cubrir la primera etapa comprendida por 38 puntos de comunicación o nodos, que consideran 3 servicios para cada uno, los cuales son gestionados mediante VLANs; estos son transmisión de audio-vídeo-datos sobre

monitores, acceso inalámbrico WiFi y control de luminarias; los nodos en cuestión fueron distribuidos de la siguiente manera sobre anillos de fibra óptica, dando lugar a la topología de red citada en la Figura 15 (Cangás Cangás, 2021).

- Primer anillo, formado por 16 nodos de comunicación o paradas.
- Segundo anillo, formado por 10 nodos de comunicación o paradas.
- Tercer anillo, formado por 12 nodos de comunicación o paradas.
- Router en el lado del NOC (Network Operations Center) con conectividad a la red de comunicación.

Figura 15.

Topología de red de las paradas interactivas de MOVIDELNOR E.P.



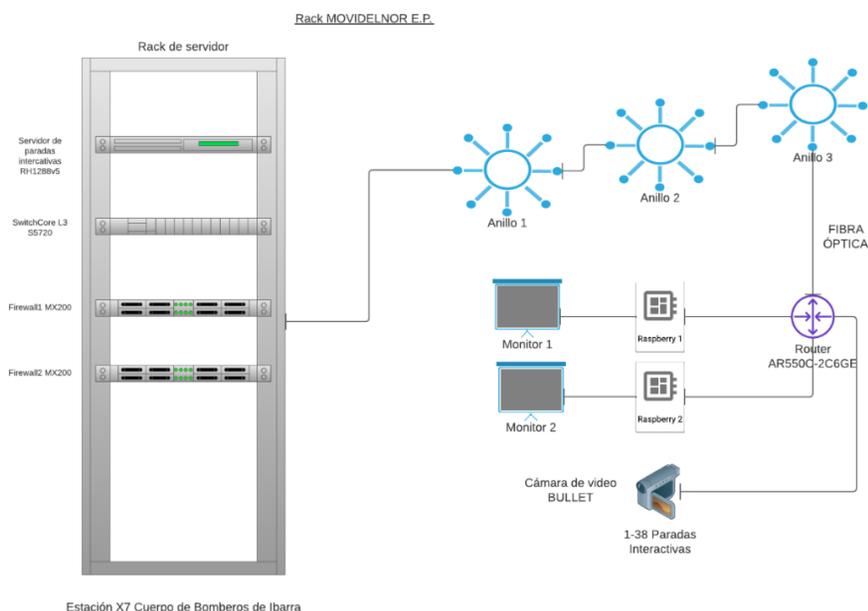
Nota. Cada anillo se encuentra formado por fibra óptica, interconectando paradas estratégicas, adaptado de (Cangás Cangás, 2021)

De acuerdo con la información expuesta por el Ing. Jairo Navarrete, funcionario del departamento de proyectos de MOVIDELNOR E.P y con respaldo en el ANEXO B de este documento, cada parada interactiva durante su operatividad no logró alcanzar por más de una semana su objetivo que era el mostrar el estado de las rutas de los autobuses de transporte público,

por lo cual para lograr su sostenibilidad se apoyó de cortometrajes publicitarios, esto se confirmó con documentos y planos referentes a la gestión del sistema desde equipos Rasperry Pi ubicados en el Data Center, donde cada uno cargaba videos publicitarios acordes a la necesidad de las pequeñas y medianas empresas de la localidad ibarreña; a continuacion en la Figura 16 se da a conocer el cómo estaba conformada la infraestructura tecnológica de las paradas interactivas, ya que hoy en día estas construcciones se están retirando de a poco dado que no hay un plan de gestión que garantice su operatividad continua.

Figura 16.

Arquitectura de la infraestructura tecnológica alojada en las paradas interactivas de MOVIDELNOR E.P.



Fuente. Adaptado de (Cangás Cangás, 2021)

Todo el sistema previamente presentado benefició a la lista de paradas expuestas en la Tabla 5, las mismas que fueron ubicadas en sitios estratégicos de la ciudad de Ibarra de acuerdo

con el último informe Nro.: EPM-DPP-2021-000-21 presentado por Cangás Cangás (2021), funcionario de MOVIDELNOR E.P. en la fecha 11 de enero de 2021.

Tabla 5.

Listado de paradas interactivas anteriormente operativas en la ciudad de Ibarra

LISTADO DE PARADAS INTERACTIVAS							
Nro.	Lote	nro.	Ubicación	Referencia			Circulación vial
1		1	Calle Hernán Gonzáles de Saa	Frente al polideportivo de Los Ceibos			S-N
2		2	Calle Hernán Gonzáles de Saa	Polideportivo de Los Ceibos			N-S
3	Av. El retorno	3	Entre calles Río Pastaza y Río Amazonas	Frente al chifa Los Ceibos			S-N
4		4	Entre calles Río Pastaza y Río Curaray	Farmacias Económicas	Los	Ceibos	N-S
5		5	Calle Río Chinchipe	Pastelería Tío Sam			S-N
6		6	Av. Ricardo Sánchez	Cementerio San Miguel, frente a U.E. Víctor Manuel Guzmán			N-S
7		1	Calle princesa Cory Cory	Parque de Caranqui, monumento Atahualpa			S-N
8	Av. Atahualpa	2	Calle Cap. José Espinoza de los Monteros	Micro mercado Danny			N-S
9		3	Calle Tobías Mena	Panadería Croissant, esquina			N-S
10		4	Entres calles Tobías Mena y Carlos Proaño	Coliseo de la Bola Amarilla			S-N
11		5	Av. Teodoro Gómez de la Torre	Farmacias Económicas, frente a Emapa, esquina			S-N
12		6	Calle Hernán Gonzáles de Saa	Frente a centro de desarrollo infantil TEA			
13		Av. Alfred	1	Calle José Joaquín de Olmedo	Farmacia Cruz Azul		

14		2	Entre calles José Joaquín de Olmedo y Sánchez y Cifuentes	Almacén El Ofertón, Almacenes Tía	O-E
15		3	Entre Av. Eugenio Espejo y calle Sánchez y Cifuentes	Frente a Mercado Amazonas	E-O
16		4	Entre Av. Eugenio Espejo y calle Darío Egas Grijalva	Frente a centro comercial La Bahía	O-E
17		5	Entre Av. Mariano Acosta y calle Luis Cabezas Borja	Frente a C.C. Plaza Centro, Parque Monseñor Leonidas Proaño	E-O
18	Calle S. y Cifuentes	1	Entre Av. Teodoro Gómez de la Torre y calle Luis Toro Moreno	Parque Germán Grijalva, Helados de la Colón	S-N
19		2	Calle Obispo Mosquera	Mercado Amazonas	S-N
20		3	Calle Miguel Oviedo	U.E. Betlemitas	S-N
21		4	Calle Eusebio Borrero	Almacén Chaide	S-N
22	Av. Jaime Rivadeneira	1	Calle Luis Vargas Torres	Frente a U.E. Ana Luisa Leoro	S-N
23		2	Calle Pedro Moncayo	Auto Repuestos Vásquez, Banco del Pichincha	S-N
24		3	Calle Pedro Moncayo	Ferretería Jorge Yépez Terán, frente a Banco Pichincha	N-S
25		4	Calle Juan de Dios Navas	Diagonal a Importadora Automotriz Flores	N-S
26		5	Calle Luis Vargas Torres	U.E. Ana Luisa Leoro	N-S
27	Av. Mariano Acosta	1	Calle Manuel de la Chica Narváez	Obelisco	E-O
28		2	Entre Av. Jaime Rivadeneira y calle Juan José Flores	Frente a Papelería Popular	E-O
29		3	Calle Gabriela Mistral	U.E. Ibarra, frente a Laguna Mall	O-E
30		4	Calle Gabriela Mistral	Frente a U.E. Ibarra	E-O
31		5	Calle Fray Bartolomé de las Casas	Frente a Hyundai	E-O
32		6	Entre Av. Camilo Ponce Enríquez y Víctor G. Jurado	Parque Ciudad Blanca	E-O

33	7	Calle Padre Jacinto Pankery	Imbauto, frente a la plaza Shopping Center	O-E
34	8	Calle Luis Felipe Borja	Frente al parque de La Florida	E-O
35	9	Calle Agustín Rosales	Semáforo de La Florida, salida de Ibarra	E-O
36	1	Av. Teodoro Gómez de la Torre	Terminal Terrestre	N-S
37	2	Entre calles Obispo Mosquera y Rafael Larrea Andrade	Locales comerciales del T. Terrestre	N-S
38	3	Entre calles Obispo Mosquera y Rafael Larrea Andrade	Frente a locales comerciales de T. Terrestre	N-S
39	4	Av. Fray Vacas Galindo y Obispo Mosquera	Talleres del Ferrocarril	N-S
40	5	Entre Av. Alfredo Pérez Guerrero y Obispo Mosquera	Mercado La Playita	N-S

Nota. Las iniciales expuestas en la columna Circulación vial hacen referencia al sentido de circulación de acuerdo a los puntos cardinales; siendo N=Norte, S=Sur, E=Este y O=Oeste,

(Cangás Cangás, 2021)

3.2 Análisis de requerimientos

En esta sección se presenta las características consideradas con el objetivo de optimizar la comunicación en red para brindar la mejor calidad en el servicio de actualización de rutas de autobuses de transporte público sobre paradas inteligentes de la ciudad de Ibarra – Ecuador, estas características a manera de requerimientos son identificados, definidos y complementados para dar cumplimiento al alcance del proyecto.

A continuación, se realiza el análisis de requerimientos obtenidos tras un estudio bibliográfico relacionado a la operatividad del proyecto local denominado “Paradas Interactivas”, para ello se plantea utilizar la definición y terminología de requerimientos de acuerdo al estándar ISO/IEC/IEEE 29148:2018 como se muestra en la Tabla 6, considerando la adaptación SyRA

(System Requirements Architecture) para establecer los requerimientos de arquitectura del sistema de comunicación.

Tabla 6.

Abreviaturas de requerimientos definidos en estándar ISO/IEC/IEEE 29148:2018

Abreviatura	Descripción
StRS	Especificación de requerimientos de las partes interesadas (Stakeholders)
SyRS	Especificación de requerimientos del sistema
SRS	Especificación de requerimientos de software
SyRA	Especificación de requerimientos de arquitectura

Fuente. (ISO/IEC, 2018)

3.2.1 Stakeholders

Stakeholders hace referencia al grupo de usuarios que son beneficiarios del proyecto y a la vez se relacionan con actividades y decisiones de este, lo que influye en su desempeño, los detalles de las partes interesadas del presente proyecto se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7.

Stakeholders

Nº	Stakeholders	Descripción
StRS1	Usuarios del sistema de comunicación (En futura implementación)	Ciudadanía que usa el transporte público urbano en la ciudad de Ibarra, Empresa de Movilidad del Norte MOVEDILNOR E.P.
StRS2	Ing. Fabian Cuzme, MSc	Director del trabajo de titulación

StRS3	Ing. Mauricio Domínguez, MSc.	Asesor
StRS4	Brayan Chandi	Desarrollador del trabajo de titulación

3.2.2 Sistema

Este apartado se enfoca a la especificación de requerimientos del sistema; para lo cual la Tabla 8 presenta la descripción de los requerimientos de hardware y software del sistema, así como las restricciones asociadas a su operatividad, dichos valores están relacionados al ambiente de simulación bajo software, puesto que no se cuenta con la infraestructura idónea para la implementación del proyecto en el país.

Tabla 8.

Requerimientos del sistema

SyRS				
REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA				
N°	Requerimiento	Prioridad		
		Alta	Media	Baja
SyRS1	El software de simulación a usar debe soportar la simulación de redes convergentes 5G MEC en conjunto con V2X	✓		
SyRS2	El software de simulación debe contar con generadores de resultados que permitan analizar eficiencia de tráfico y rendimiento de la red de comunicación	✓		

SyRS3	El software de simulación debe ser accesible y contar con base de pruebas sobre entornos de estudio de nivel científico	✓
SyRS4	El software de simulación debe ser compatible con el hardware disponible por el autor de este estudio	✓
SyRS5	El software de simulación debe contar con los diferentes módulos que forman parte de una infraestructura MEC 5G y estos deben ser modificables de acuerdo con el escenario de simulación	✓
SyRS6	El software de simulación debe permitir simular redes móviles bajo área/celdas	✓
SyRS7	El software de simulación debe permitir la implementación de protocolos de comunicación, acceso al medio y validación de datos.	✓
SyRS8	El software de simulación debe permitir el montaje de la infraestructura de red sobre las características de la zona urbana a evaluar, ciudad de Ibarra.	✓
SyRS9	El software de simulación debe presentar una interfaz gráfica amigable con el usuario que permita la definición de condiciones de pruebas.	✓
SyRS10	El software de simulación debe permitir la simulación en tiempo real con el fin de conseguir un resultado	✓

aproximado en gran medida a las condiciones del entorno a evaluar.

3.2.3 Arquitectura

En esta sección se presentan los requerimientos a manera de elementos de infraestructura, los cuales permiten satisfacer las necesidades del proyecto; estos deben garantizar la convergencia de una red óptima con soporte para flujo de tráfico alto y continuo. Por lo tanto, a continuación, se menciona de forma general las partes intervinientes en la red de comunicación en conjunto con sus condiciones de ejecución entorno al espectro radioeléctrico para la quinta generación de comunicaciones móviles denominada 5G.

- **Tecnología 5G:** Corresponde a la quinta generación de redes móviles, en donde su infraestructura depende de la distribución de antenas de 100 a 300 metros de distancia entre sí bajo frecuencias de trabajo de 1[GHz] a 6[GHz], en donde a mayor frecuencia menor es la cobertura; para dar paso a la tecnología 5G, actualmente la adjudicación de frecuencias en Ecuador es 700[MHz], 2.5[GHz] y 3.5[GHz] con el fin de optimizar la red 4G (Buenaño Silva & Terán Suárez, 2020).
- **Equipos sobre red de transporte 5G:** Hace referencia a los dispositivos necesarios para lograr la convergencia en red, misma que aportara a la gestión de información con mínima latencia, estos equipos se definen de forma general y a posterior serán definidos de manera específica de acuerdo con las necesidades de la red sobre la zona a implementar.
 - **UPF:** User Plane Function, permite el enrutamiento y reenvío de paquetes, calidad de servicio QoS, inspección de paquetes, entre otros; además actúa

como punto de interconexión a la red de datos y el punto de anclaje de movilidad entre y dentro de las Radio Access Technologies – RAT, toma como base parte de la funcionalidad del SGW y PGW en Evolved Packet Core – EPC 4G (Millan, 2019).

- eNodeB y gNodeB: eNodeB corresponde a la estación base inalámbrica para 4G, mientras que gNodeB para 5G, las 2 son compatibles con 3GPP; por parte de 5G se pone a disposición funciones de red independientes con protocolos New Radio – NR Radio Access Network – RAN como: PHY, MAC, RLC, PDCP, SDAP, RRC, NRAP (BetterMing, 2021), mientras que para 4G las funciones de red corresponden a la convergencia con EPC.
- Router: Permite el direccionamiento de paquetes de datos entre diferentes redes asociadas bajo protocolos de comunicación, generalmente brinda la comunicación entre redes LAN y WAN.
- Switch Core: Permite la conmutación de subredes con bajo, medio o alto tráfico de datos, al ser un equipo también de capa 3 puede direccionar el tráfico de estas al igual que un router, su uso común es la interconexión de host para formar redes de área local LAN.
- Dispositivos de captura de datos vehiculares mediante sistema de transporte inteligente (ITS): Equipos que permiten la difusión de información vehicular para la gestión de la red vial y de tránsito, su nivel de aplicación más bajo es la obtención de coordenadas mediante la función de posicionamiento global conocida como GPS.

La asociación de dichos elementos da paso a los siguientes requerimientos de operatividad que se describen en la Tabla 9 bajo la aplicación de los criterios expuestos en el estándar IEEE 29148:2018.

Tabla 9.

Requerimientos de arquitectura de la red de comunicación

SyRA				
REQUERIMIENTOS DE ARQUITECTURA				
N°	Requerimiento	Prioridad		
		Alta	Media	Baja
SyRA1	El sistema debe tener comunicación con las redes móviles 5G locales simuladas para transmisión de datos capturados	✓		
SyRA2	Las fuentes de origen deben contar con dispositivos para la obtención de coordenadas o en su defecto generar paquetes de datos similares		✓	
SyRA3	La captura de información por parte de la RAN debe ser periódica	✓		
SyRA4	La gestión de la información capturada se realiza en la MEC y se depura en el Data Center		✓	
SyRA5	La visualización de estado de rutas debe llegar a los nodos o paradas con la mínima latencia	✓		

SyRA6	Las paradas inteligentes deben contar con una fuente de energía sostenible/alternativa y como respaldo la brindada por la empresa pública	✓
SyRA7	Los enlaces entre equipos de red deben garantizar el alto tráfico de datos de bajada >20 [Gbps] con promedio de 0.1 [Gbps] por usuario y subida >10 [Gbps] con promedio de 0.1 [Gbps] por usuario de acuerdo con eMBB ⁵⁴ .	✓
SyRA8	Las pruebas sobre los equipos de red simulados deben realizarse para condiciones de infraestructura 5G independiente	✓

Toda la arquitectura en conjunto se estructura sobre un plano urbano de la ciudad de Ibarra, considerando su extensión y relieve para la distribución de estaciones base eNodeB (4G) y gNodeB (5G) con el fin de garantizar la conectividad en el sistema y por consiguiente la convergencia de la red.

3.3 Selección de software de simulación

Una vez analizados los requerimientos necesarios para garantizar la eficacia del sistema de comunicación, se procede a estructurarlo en un entorno de simulación para posteriores pruebas en función de posibles escenarios. Dicho análisis permite considerar como software de simulación óptimo a OMNET++ ya que, como se indica en la Tabla 4 de este documento, este permite estructurar sistemas de comunicación completos y analizar el flujo de tráfico de los mismos en entornos de redes móviles. Además, gracias a sus paquetes complementarios es adecuado para la

⁵⁴ Información considerada de características de diseño de proyectos a nivel de producción, descritos en el ANEXO C.

simulación de movilidad vehicular, que es el eje fundamental de generación de datos para este proyecto. Otros paquetes como Simu5G, INET y VEINS permiten extraer módulos que ayudan a evaluar el rendimiento de la tecnología MEC en una red de quinta generación; para verificar este criterio, a continuación, en la Tabla 10 se da a conocer la validación de los requerimientos del sistema en relación con los software de simulación investigados, tomando las consideraciones de la Tabla 8 y mostrando su conveniencia se muestra en base a valores cualitativos.

Tabla 10.

Validación de requerimientos del sistema sobre softwares de simulación de redes investigados con interpretación 1=CUMPLE y 0=NO CUMPLE

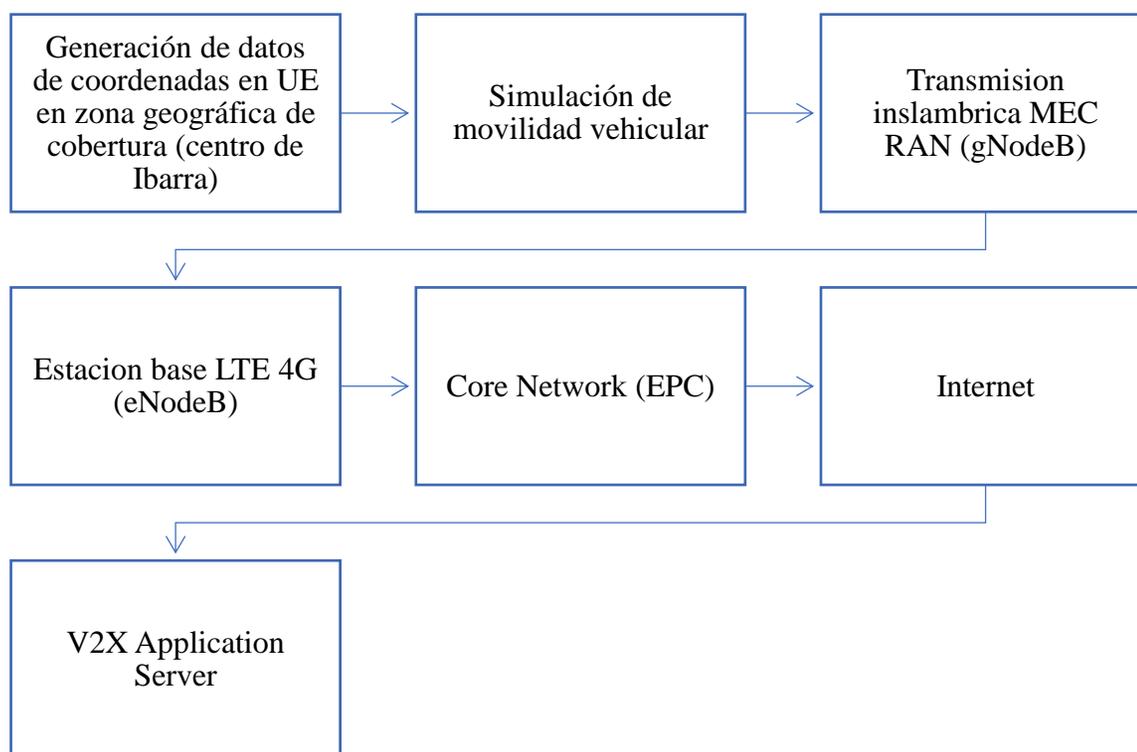
REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA (SyRS)	OMNET++	NS3	OPNET Modeler (Academy)
SyRS1	1	0	0
SyRS2	1	1	1
SyRS3	1	1	1
SyRS4	1	1	1
SyRS5	1	1	0
SyRS6	1	1	1
SyRS7	1	1	1
SyRS8	1	0	0
SyRS9	1	0	1
SyRS10	0	0	0
TOTAL, DE EVALUACIÓN	9/10	6/10	6/10

3.4 Diseño de sistema de comunicación

Tras haber analizado los requerimientos del sistema para garantizar su óptimo funcionamiento, se procede a estructurarlo con base al alcance planteado. Para ello, se hace uso del software de simulación identificado como óptimo en la Tabla 10, y así definir la infraestructura para realizar pruebas de comunicación; los procesos previstos se resumen en el diagrama de bloques de la Figura 17.

Figura 17.

Diagrama de bloques de etapas del sistema de comunicación



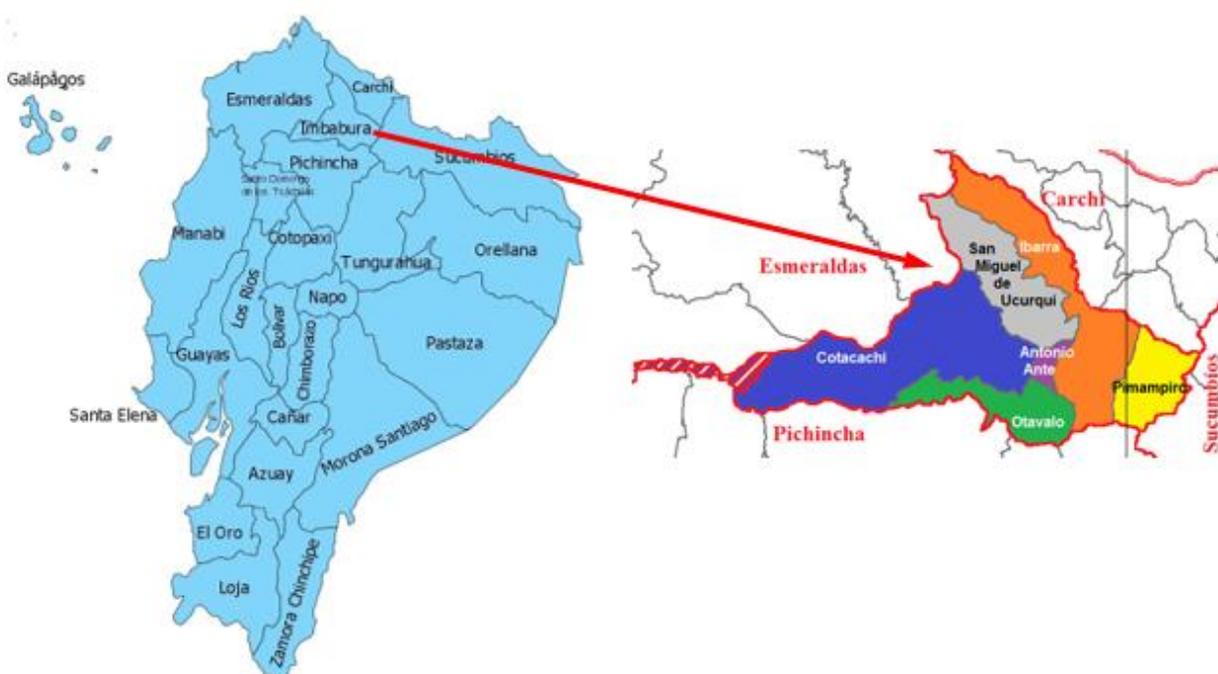
3.4.1 Delimitación de zona de cobertura

En base a los requerimientos de sistema y arquitectura planteados, a continuación, se presenta los elementos clave para la operación del sistema de comunicación, como el entorno

geográfico y la red física/lógica; esto brindará soporte para la gestión de datos definidos como el estado de rutas de autobuses de transporte público en la ciudad de Ibarra, que se identifica en la Figura 18. Como primero paso, es necesario definir la zona de evaluación, para lo cual se ha seleccionado un área específica en la zona urbana de la ciudad.

Figura 18.

Mapa del cantón Ibarra ubicado en la provincia de Imbabura – Ecuador



Nota. Adaptado a imagen unificada de (GAD Imbabura, 2022; maplover, 2022)

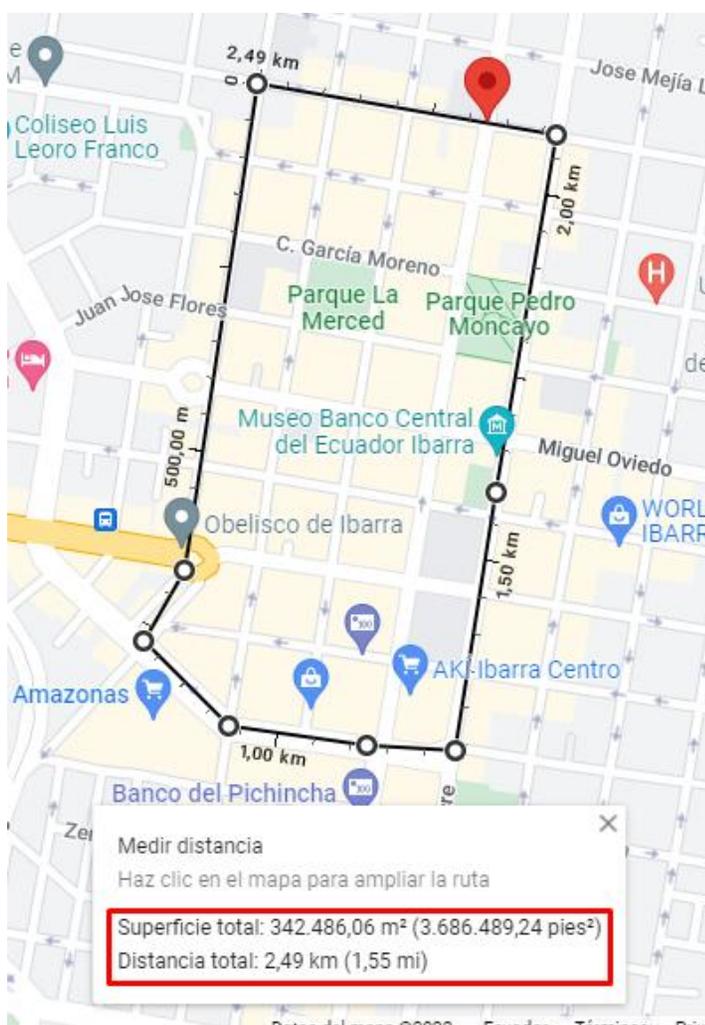
El área geográfica seleccionada para pruebas se muestra en la Figura 19 y se considera debido al alto nivel de tráfico que existe en horas laborables y horas pico (alrededor de las 13h00 debido a la salida de estudiantes de escuelas y colegios, así como de empleados). Estas métricas se han identificado en el proyecto de estudio *“Modelación y simulación de tráfico vehicular en horas pico para el centro de la ciudad de Ibarra, a través de una red Ad-Hoc Vanet”* de Marcillo

del Castillo (2020) gracias a la opción tráfico de Google Maps como se muestra en la Figura 20 y documentación de entidades competentes en el sector, como MOVIDELNOR E.P, ECU 911 y el GAD Municipal de Ibarra de la administración pública vigente

Figura 19.

Área geográfica para estudio de eficiencia de sistema de comunicación planteado con Límites:

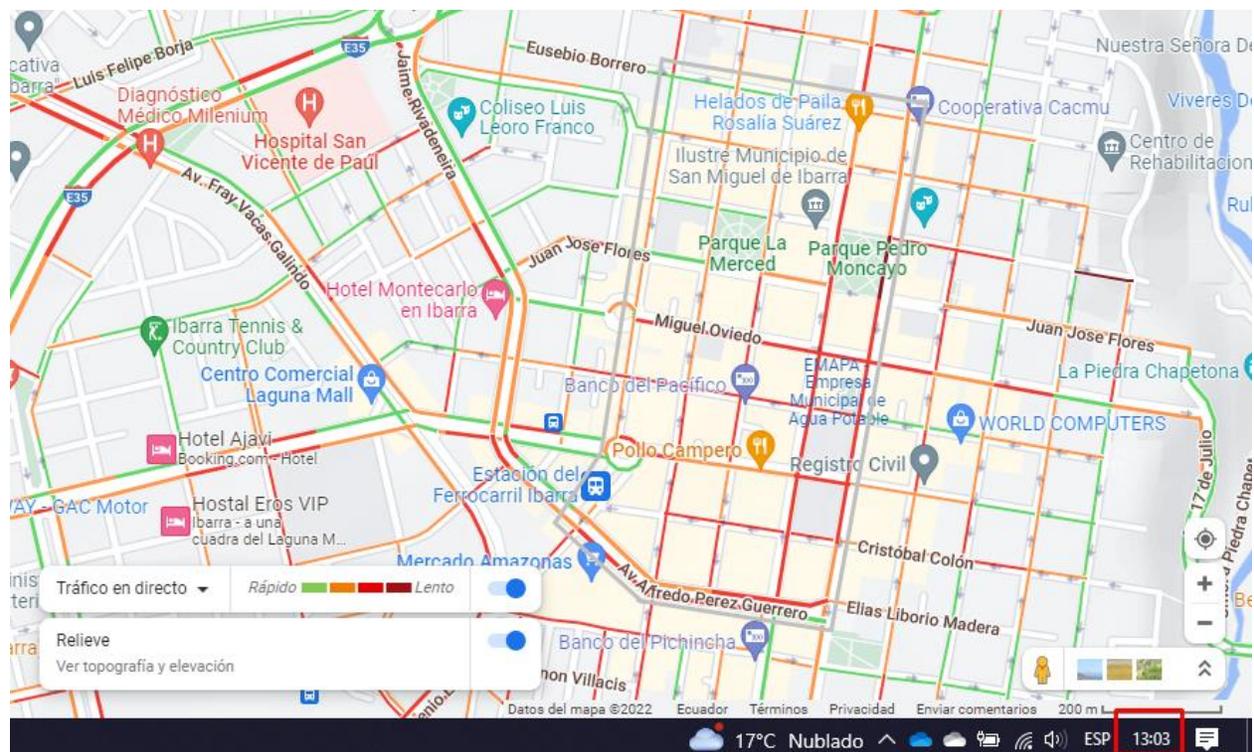
Calles Eusebio Borrero – Antonio José de Sucre – Av. Pérez Guerrero – Chica Narváez



Fuente. (GoogleMaps, 2022)

Figura 20.

Intensidad de tráfico vehicular dentro del área geográfica planteada



Nota. Intensidad de tráfico vehicular capturada en tiempo real a las 13h00 en la zona central de la ciudad de Ibarra a través de la opción de GoogleMaps, la intensidad de color hace referencia a los cambios en el tráfico vehicular, *Fuente.* (GoogleMaps, 2022)

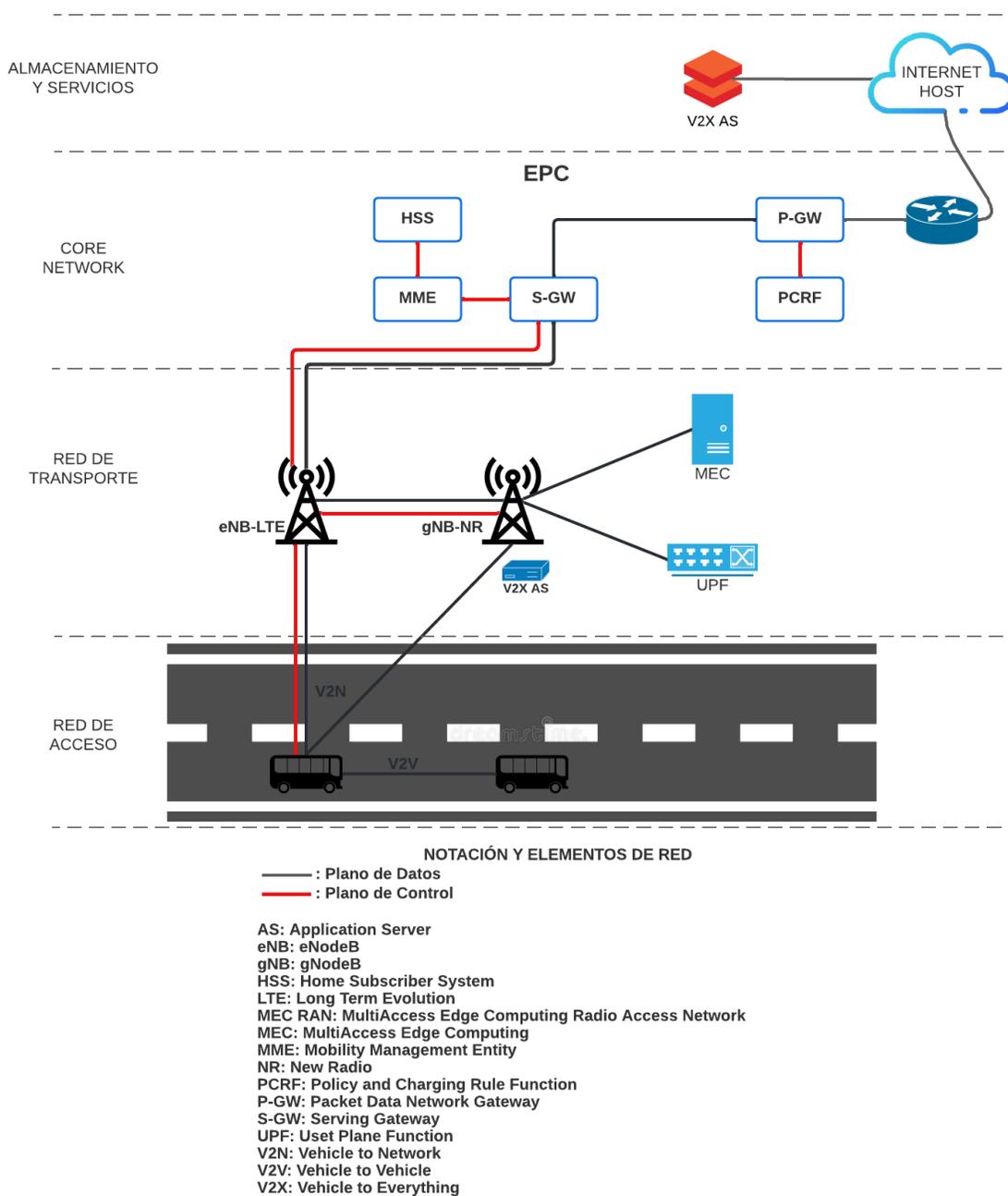
3.4.2 Propuesta de infraestructura de comunicación

Una vez identificada la zona de evaluación, se procede a definir la infraestructura de comunicación. Para ello, se toma como referencia el análisis planteado en el ANEXO C, mismo que establece cuatro proyectos que manejan criterios de implementación con enfoque al rendimiento de una red de comunicación para servicios V2X, esto en conjunto con el marco de referencia ETSI MEC permiten proponer la arquitectura de red que se muestra en la Figura 21

como soporte para el flujo de tráfico de datos en función del número de paradas disponibles en la zona delimitada, relieve geográfico y densidad vehicular.

Figura 21.

Arquitectura de red propuesta para comunicación V2X-MEC-5G (NSA)



La arquitectura de red propuesta cuenta con etapas de comunicación que parten de la captura de información desde los UE mediante sensores dedicados, estos tienen como función esencial, emitir datos de coordenadas geográficas de las unidades vehiculares móviles, para que luego, tras un adecuado tratamiento de la información recibida en las estaciones base o eNodeB (4G) y gNodeB(5G), sea posible exponerla con la menor latencia. De esta manera, se proyecta un futuro entorno Smart en tiempo real que contribuye significativamente al desarrollo de la movilidad urbana.

A continuación, se describe con mayor profundidad cada una de las etapas comprendidas en la comunicación de acuerdo con el stack expuesto en la Figura 21.

3.4.2.1 Red de Acceso

Se encuentra conformada por los UE, que son los buses de transporte público de la ciudad de Ibarra. Estos a través de sensores dedicados en conjunto con las tecnologías OBU – ITS, se encargan de difundir periódicamente información de posicionamiento mediante el espectro inalámbrico hacia los NodeB, lo que permitirán la captura de datos relevantes mientras los UE se encuentren dentro de la zona de cobertura, misma que está delimitada de acuerdo con lo expuesto en la Figura 19 en la zona central de la ciudad de Ibarra. Para ello, es necesario la coexistencia de la interfaz de New Radio (NR) de 5G con LTE y su infraestructura de Core EPC que integra a 4G Radio; de esta forma, se logra integrar funciones de red de acceso de dos tecnologías, donde los protocolos específicos de la interfaz de radio terminan en los NodeB y de forma más centralizada en gNodeB, en donde se realiza la transmisión de paquetes IP desde/hacia los UE junto con mensajes de señalización para controlar la operación de la interfaz de radio.

3.4.2.2 Red de Transporte

Conformada por una red lineal con el fin de lograr la gestión estable y centralizada de tráfico en la zona urbana de la ciudad de Ibarra; dicha etapa se encuentra conformada principalmente por los equipos User Plane Function (UPF) y MultiAccess Edge Computing Host para cada estación base (MEC Host), los cuales son elementos fundamentales de una arquitectura de infraestructura central 3GPP 5G de acuerdo con el marco de referencia ETSI MEC. La UPF es el punto de interconexión de la infraestructura móvil y la red de datos (DN), ya que proporciona enrutamiento/reenvío de paquetes y manejo de QoS por flujo; por su parte el MEC Host, a través de la interconexión por interfaz Xn con la UPF, contribuyen a la reducción de requisitos de ancho de banda de backhoul móvil y permite el almacenamiento de aplicaciones y procesos locales para exponer servicios con la menor latencia a usuarios finales.

3.4.2.3 Core Network

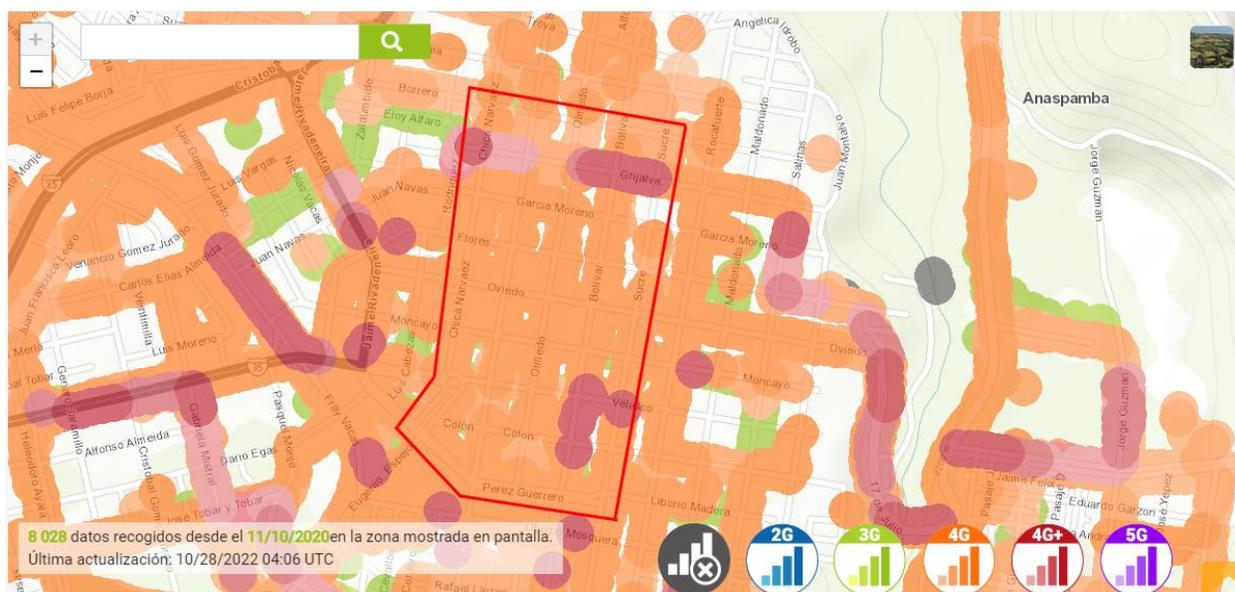
Consiste en la red central 4G definida como EPC y se encarga de ofrecer los servicios a los usuarios interconectados a la red de acceso bajo la función clave de dirigir las peticiones a la red pública; en esta etapa de la red se usan los dispositivos enrutadores y conmutadores debido a la operación de tecnologías de capa de red y enlace de datos; como se muestra en la Figura 21, para el correcto tratamiento de la información es necesario la intervención de entidades clave de hardware que son: Mobility Management Entity (MME) encargado de procedimientos de control como autenticación, seguridad y almacenamiento de los datos; Service Gateway (S-GW) encargado del enrutamiento, transmisión y acoplamiento de datos con la PCRF; y finalmente la entidad Packet Data Network Gateway (P-GW) que permite la comunicación IP y de conmutación.

Dichos elementos en conjunto con los nodos de software denominados Home Subscriber Server (HSS) como base de datos de 3GPP y Policy and Charging Rules Function (PCRF) permiten

la conectividad IP de equipos de usuario, su función se encuentra descrita de forma teórica en la sección 2.1.2 de este documento, además su operatividad disponible en la zona de evaluación correspondiente al centro de la ciudad de Ibarra – Ecuador se muestra continuación en las Figuras 22, 23, 24 y 25 de acuerdo a mapas de cobertura en tiempo real emitidos por el sitio web www.nperf.com para cada una de las operadoras móviles existentes.

Figura 22.

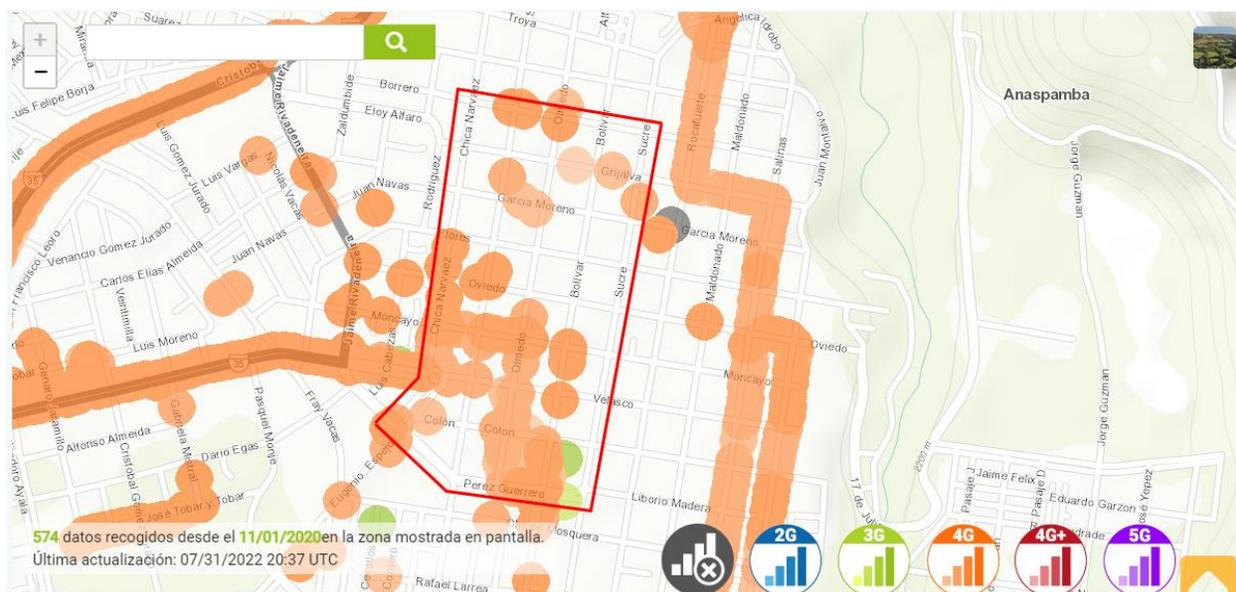
Mapa de cobertura para las redes móviles operativas en Claro – CONECEL S.A



Fuente. (www.nperf.com, 2022a)

Figura 23.

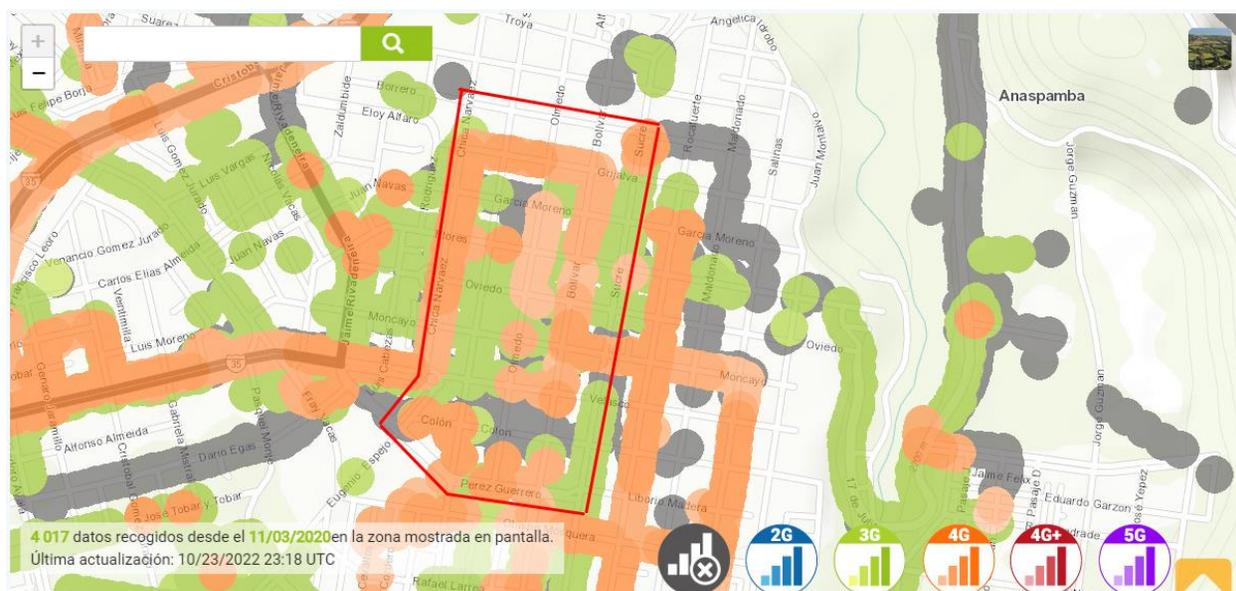
Mapa de cobertura para las redes móviles operativas en CNT - EP



Fuente. (www.nperf.com, 2022b)

Figura 24.

Mapa de cobertura para las redes móviles operativas en Movistar – OTECEL S.A



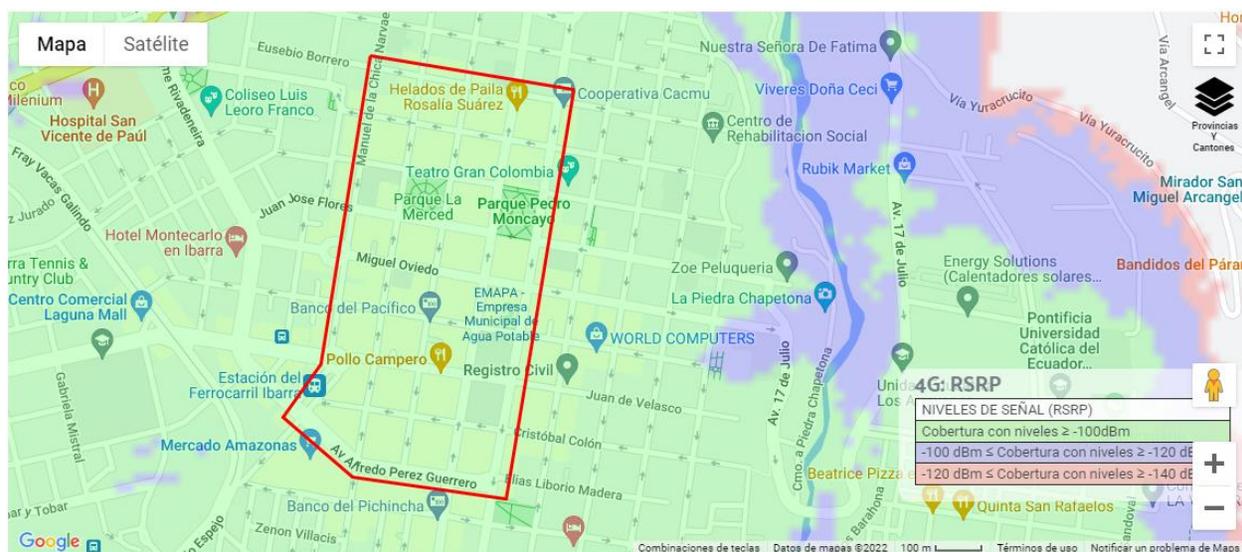
Fuente. (www.nperf.com, 2022c)

Por parte de Tuenti se muestran los niveles de cobertura extraídos específicamente para 4G LTE desde su página oficial www.tuenti.ec, cabe destacar que al ser una operadora móvil virtual su infraestructura depende de Telefónica, organización que está al frente de Movistar OTECEL S.A.

Figura 25.

Mapa de cobertura para las redes móviles operativas en Tuenti – OTECEL S.A

g



Fecha de actualización 01/07/2022

Fuente. (www.tuenti.ec, 2022)

Al proponerse una infraestructura 5G NSA en el presente proyecto, los datos antes presentados se toman como referencia de distribución actual de estaciones bases 4G y 4G LTE que existen en la zona central de la ciudad, ya que en función de estas es posible cubrir el tráfico de datos de forma periódica entre usuarios móviles.

3.4.2.4 Almacenamiento y Servicios

Esta etapa comprende la red pública externa, en donde toda la información capturada y tratada en previos procesos es receptada y publicada en nodos de visualización y aplicaciones dedicadas para el servicio, su interconexión depende directamente del objetivo comercial de la empresa a cargo o del proveedor de servicios y su fuerte es la asociación a la red de internet para el uso de servidores y bases de datos en Cloud con el fin de mantener un sistema estable, óptimo y siempre disponible.

Como apoyo a la arquitectura de red propuesta; la Figura 26 describe los procesos de comunicación ejecutados, estos han sido construidos bajo criterios técnicos dentro de los marcos de red de acceso y transporte, detallando así etapas secuenciales de tratamiento de información basadas en protocolos implementados con el fin de condicionar el paso de la información mediante portadoras a través de la infraestructura 4G y 5G. Una de las fases destacables es el uso del protocolo GTP (GPRS Tunelling Protocol), que actúa en base a un grupo de protocolos de comunicación basados en IP para portar el servicio GPRS dentro de redes de posteriores generaciones; su principal función es la señalización entre el nodo de soporte del servicio gNodeB y el nodo eNodeB que opera como compuerta EPC, permitiendo de esta forma intervenir con la sesión de usuario y condicionar parámetros QoS para dar prioridad a servicios en función del tiempo.

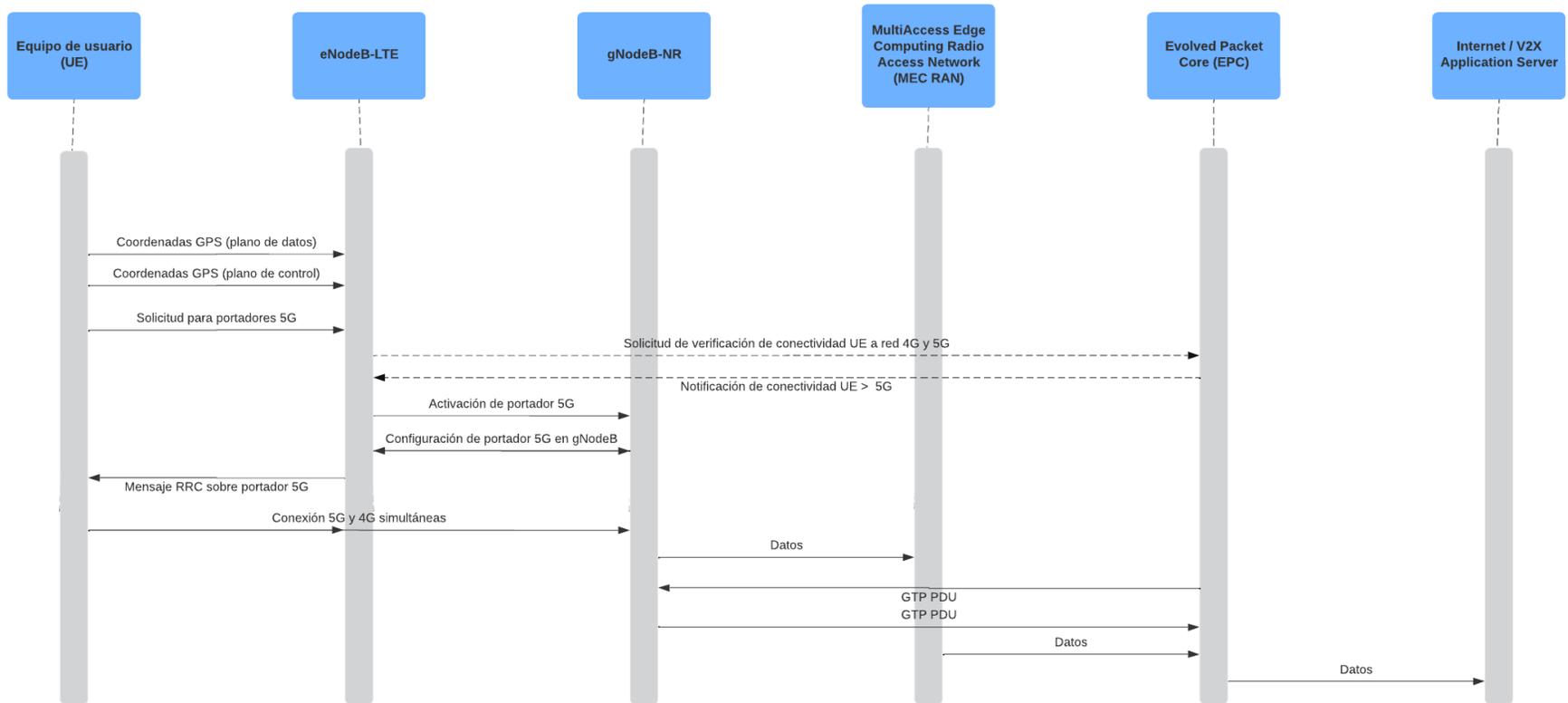
En la fase MEC, los procesos ejecutados tienen como objetivo el tratamiento de información basándose en pasos preconfigurados por software de acuerdo con el marco de referencia ETSI y la distribución de equipos sobre la infraestructura de red. Por ello, en esta sección no se detalla a profundidad, al igual que la etapa de Internet. El enfoque de este estudio se centra concretamente en la evaluación de tráfico de datos a través de la red de transporte 5G NSA.

Figura 26.

Diagrama de secuencia de funcionamiento del sistema de comunicación

Diagrama de secuencia de operación de red V2X-MEC-5G(NSA)

Chandi Brayán | 2022



RRC: Protocolo de control de recursos de radio
GTP - PDU: GPRS Tunelling Protocol - Protocol Dara Unit

4 CAPÍTULO IV: IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS

Como cuarto capítulo, se muestra el proceso de implementación del sistema de comunicación sobre el software de simulación seleccionado, mismo que se instauró de acuerdo con criterios de operación, etapas de gestión de datos y condiciones de transmisión por parte de elementos de red dentro del marco de las tecnologías establecidas; esto permite la evaluación del entorno en base a escenarios de demanda de tráfico y condiciones de movilidad con el fin de emitir criterios de rendimiento del proyecto.

4.1 Implementación de diseño sobre entorno de simulación

En este apartado se da a conocer la implementación del entorno de comunicación simulado en sus etapas de acceso y transporte; siendo la movilidad vehicular la fuente de captura de datos, los cuales se envían y acceden a una RSU como se indica en la sección **4.1.1** de este capítulo; por otro lado, la red de transporte 5G NSA se encarga de la gestión y tratamiento de la información a través de un sistema MEC para su posterior difusión, además se considera la implementación de unidades vehiculares móviles con el establecimiento de un paquete de datos fijo que simula el servicio V2X propuesto como se indica en la sección **4.2.1**.

4.1.1 Movilidad vehicular como fuente de datos

Una vez delimitada el área geográfica para la evaluación de la red de comunicación se procede con la programación de rutas de movilidad en SUMO v.1.8.0 de acuerdo con la información capturada de los programas GoogleMaps y OpenStreetMap para luego dar lugar a la implementación de las mismas como base de prueba para la arquitectura de red definida en la sección **3.4.2** en función a requerimientos descritos en la sección **3.2** y criterios de diseño que se toman del ANEXO C; para ello se programa dicho entorno sobre el software de simulación

Omnet++ v.6.0. con integración de los respectivos módulos Simu5G, VEINS e INET. El proceso descrito para la etapa de generación de datos de estado vehicular se detalla a continuación.

4.1.1.1 Importación de mapa georreferenciado

Como primera etapa de simulación se trabaja sobre el sistema operativo Windows 10, en donde se condiciona el entorno geográfico de movilidad vehicular, para ello se usa el software online OpenStreetMap (OSM), desde el cual se selecciona el cuadrante a analizar y a posterior se usa la opción “exportar” para generar el archivo *.osm* como se muestra en las Figuras 27 y 28, este último se recomienda almacenar en la carpeta SUMO o el repositorio definido para archivos del proyecto.

Figura 27.

Identificación de zona geográfica a evaluar

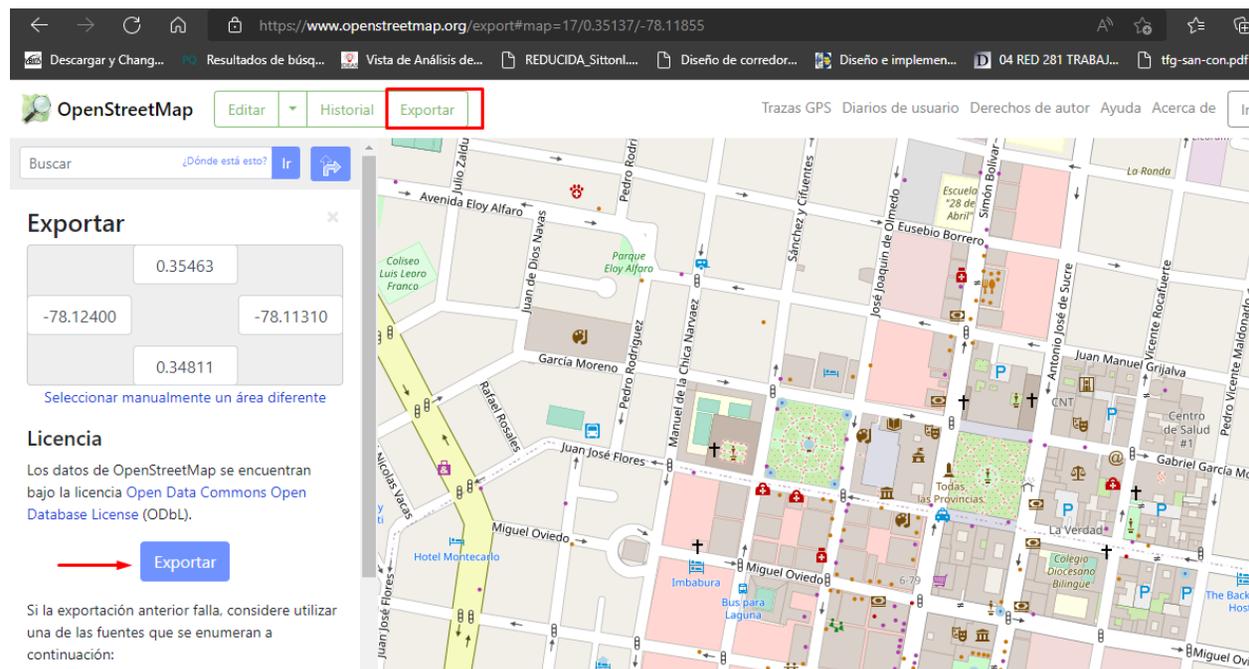


Figura 28.

Archivo .osm extraído de zona geográfica

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
ibarraCentro.osm	26/04/2022 8:54	Archivo OSM	1.571 KB

Tras haber obtenido el archivo fuente para la simulación de la zona geográfica se procede con la ejecución de la herramienta **netconvert**, disponible en el repositorio **bin > SUMO** para la obtención del archivo **.net.xml**, el cual contiene información de estructuras dentro de intersección vial y lógica de derecho de paso; el proceso realizado se muestra en la Figura 29 y su verificación en la Figura 30.

Figura 29.

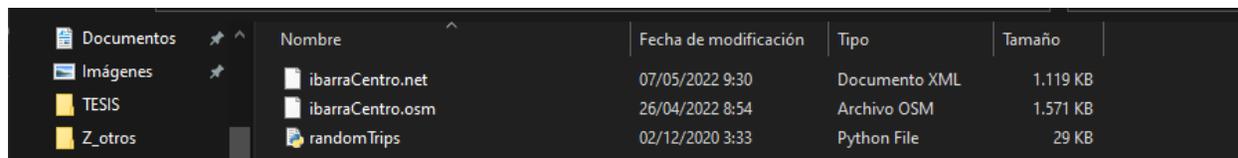
Generación de archivo .net.xml para edición de características de movilidad

```

C:\Windows\System32\cmd.exe
Microsoft Windows [Versión 10.0.19043.1645]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

D:\PROGRAMAS\sumo-1.8.0\TESIS>netconvert --osm-files ibarraCentro.osm -o ibarraCentro.net.xml
Warning: Discarding unknown compound 'usage.tourism' in type 'railway.rail|usage.tourism' (first occurrence for edge '45100943').
Warning: Discarding unusable type 'railway.station' (first occurrence for edge '493361328').
Warning: Discarding unusable type 'waterway.fuel' (first occurrence for edge '493361875').
Warning: Found angle of 127.47 degrees at edge '-906693273#1', segment 1.
Warning: Found sharp turn with radius 5.89 at the start of edge '894853371#1'.
Warning: Found angle of 127.47 degrees at edge '906693273#1', segment 0.
Warning: Converting invalid rail_crossing to traffic_light at junction '1236775189'.
Warning: The traffic light '1564514335' does not control any links; it will not be build.
Warning: Could not build program '0' for traffic light '1564514335'
Warning: The traffic light '2138309049' does not control any links; it will not be build.
Warning: Could not build program '0' for traffic light '2138309049'
Warning: The traffic light '321483178' does not control any links; it will not be build.
Warning: Could not build program '0' for traffic light '321483178'
Warning: The traffic light '662693491' does not control any links; it will not be build.
Warning: Could not build program '0' for traffic light '662693491'
Warning: The traffic light '662693841' does not control any links; it will not be build.
Warning: Could not build program '0' for traffic light '662693841'
Warning: The traffic light '662693847' does not control any links; it will not be build.
Warning: Could not build program '0' for traffic light '662693847'
Warning: Speed of straight connection '51962530#1_0->51962538#1_0' reduced by 6.48 due to turning radius of 9.98 (length=3.95, angle=39.65).
Warning: Speed of straight connection '51962522#8_0->409617665#1_0' reduced by 5.44 due to turning radius of 12.97 (length=7.37, angle=49.71).
Warning: Speed of turning connection '906693275#4_0->559232624#2_0' reduced by 41.58 due to turning radius of 1.49 (length=1.62, angle=169.99).
Success.
D:\PROGRAMAS\sumo-1.8.0\TESIS>

```

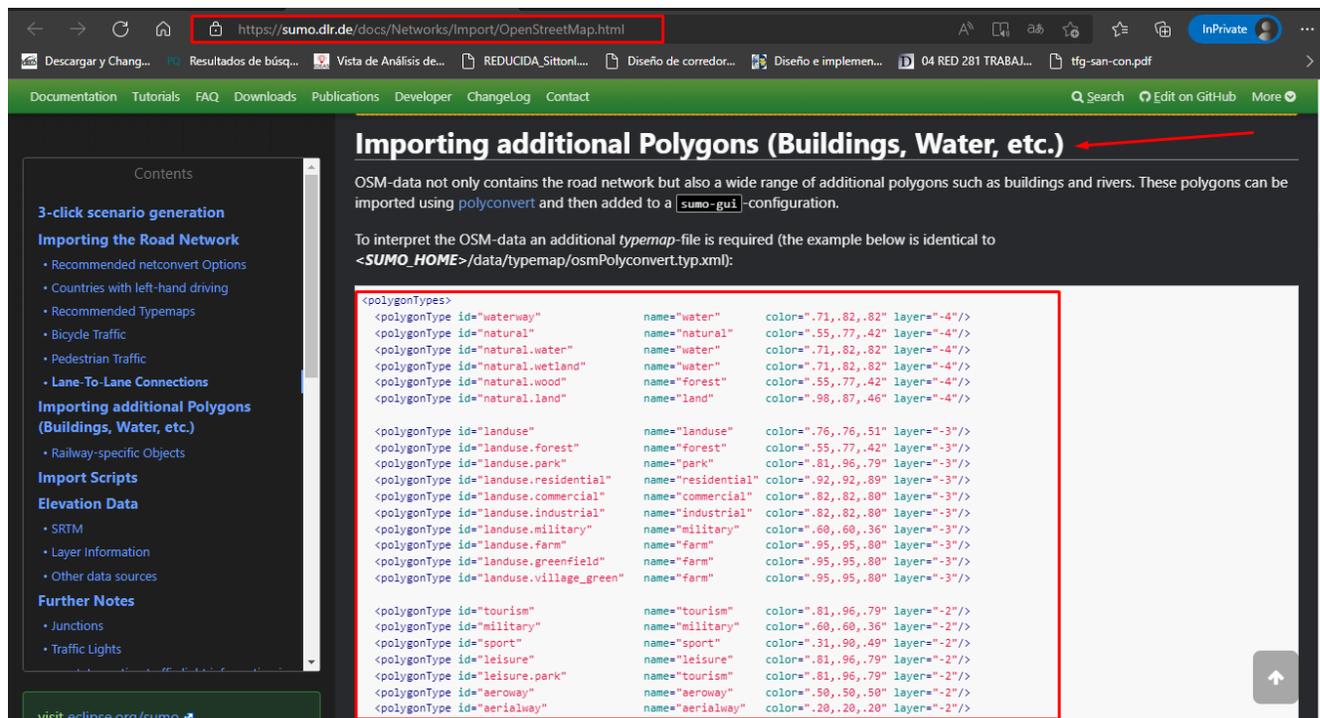
Figura 30.*Verificación de archivos generados*

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
ibarraCentro.net	07/05/2022 9:30	Documento XML	1.119 KB
ibarraCentro.osm	26/04/2022 8:54	Archivo OSM	1.571 KB
randomTrips	02/12/2020 3:33	Python File	29 KB

Es necesario que, para una adecuada generación de atributos físicos en la red vial, se agregue características adicionales denominadas *Polygons*, esto se encuentra disponible en la página oficial de SUMO como se muestra en la Figura 31; el código fuente debe ser copiado para crear un archivo nuevo denominado *typemap.xml* dentro del repositorio asignado, a partir de ello se genera un archivo *.poly.xml*, el cual condiciona esas características sobre el mapa base generado inicialmente como *.net.xml*; como verificación del proceso se genera el archivo *ibarraCentro.poly.xml* con la línea de comandos que se muestra en la Figura 32.

Figura 31.

Importación de polígonos adicionales para estructuración de características de zona geográfica

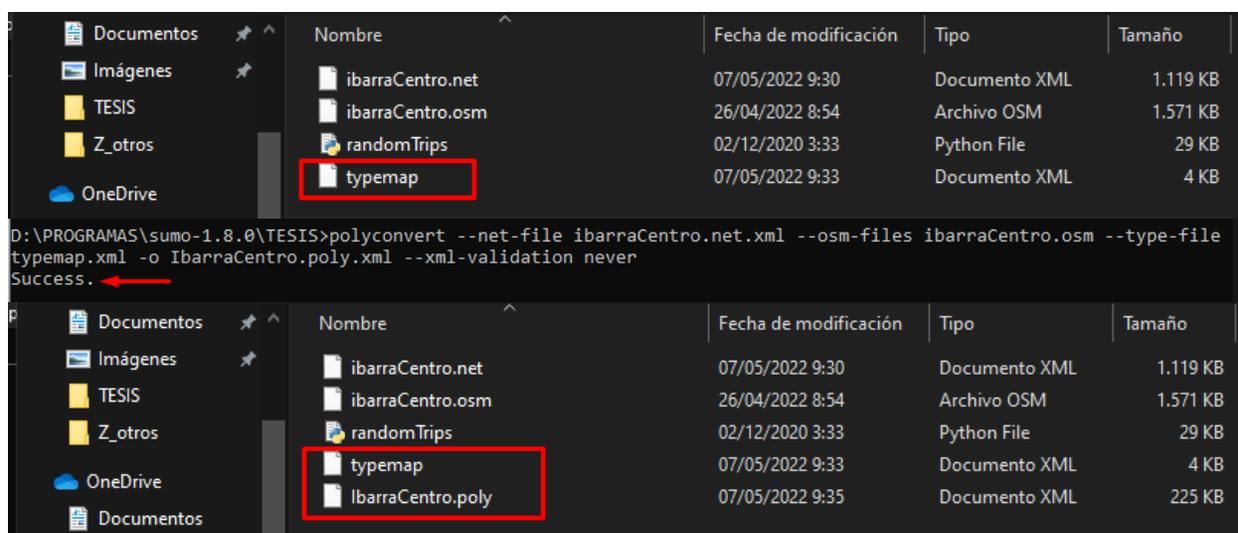


The screenshot shows the SUMO website page titled "Importing additional Polygons (Buildings, Water, etc.)". The page content includes a table of polygon types and their corresponding XML tags for use in a typemap file. The table is as follows:

OSM Polygon Type	XML Name	Color	Layer
<polygonType id="waterway"	name="water"	color=".71,.82,.82"	layer="-4"/>
<polygonType id="natural"	name="natural"	color=".55,.77,.42"	layer="-4"/>
<polygonType id="natural.water"	name="water"	color=".71,.82,.82"	layer="-4"/>
<polygonType id="natural.wetland"	name="water"	color=".71,.82,.82"	layer="-4"/>
<polygonType id="natural.wood"	name="forest"	color=".55,.77,.42"	layer="-4"/>
<polygonType id="natural.land"	name="land"	color=".98,.87,.46"	layer="-4"/>
<polygonType id="landuse"	name="landuse"	color=".76,.76,.51"	layer="-3"/>
<polygonType id="landuse.forest"	name="forest"	color=".55,.77,.42"	layer="-3"/>
<polygonType id="landuse.park"	name="park"	color=".81,.96,.79"	layer="-3"/>
<polygonType id="landuse.residential"	name="residential"	color=".92,.92,.89"	layer="-3"/>
<polygonType id="landuse.commercial"	name="commercial"	color=".82,.82,.80"	layer="-3"/>
<polygonType id="landuse.industrial"	name="industrial"	color=".82,.82,.80"	layer="-3"/>
<polygonType id="landuse.military"	name="military"	color=".60,.60,.36"	layer="-3"/>
<polygonType id="landuse.farm"	name="farm"	color=".95,.95,.80"	layer="-3"/>
<polygonType id="landuse.greenfield"	name="farm"	color=".95,.95,.80"	layer="-3"/>
<polygonType id="landuse.village_green"	name="farm"	color=".95,.95,.80"	layer="-3"/>
<polygonType id="tourism"	name="tourism"	color=".81,.96,.79"	layer="-2"/>
<polygonType id="military"	name="military"	color=".60,.60,.36"	layer="-2"/>
<polygonType id="sport"	name="sport"	color=".31,.90,.49"	layer="-2"/>
<polygonType id="leisure"	name="leisure"	color=".81,.96,.79"	layer="-2"/>
<polygonType id="leisure.park"	name="tourism"	color=".81,.96,.79"	layer="-2"/>
<polygonType id="aeroway"	name="aeroway"	color=".50,.50,.50"	layer="-2"/>
<polygonType id="aerialway"	name="aerialway"	color=".20,.20,.20"	layer="-2"/>

Figura 32.

Creación exitosa de archivo de características físicas typemap.xml



The screenshot shows a Windows File Explorer window displaying a list of files. The file 'typemap' is highlighted with a red box. Below the file explorer, a terminal window shows the command used to create the typemap file:

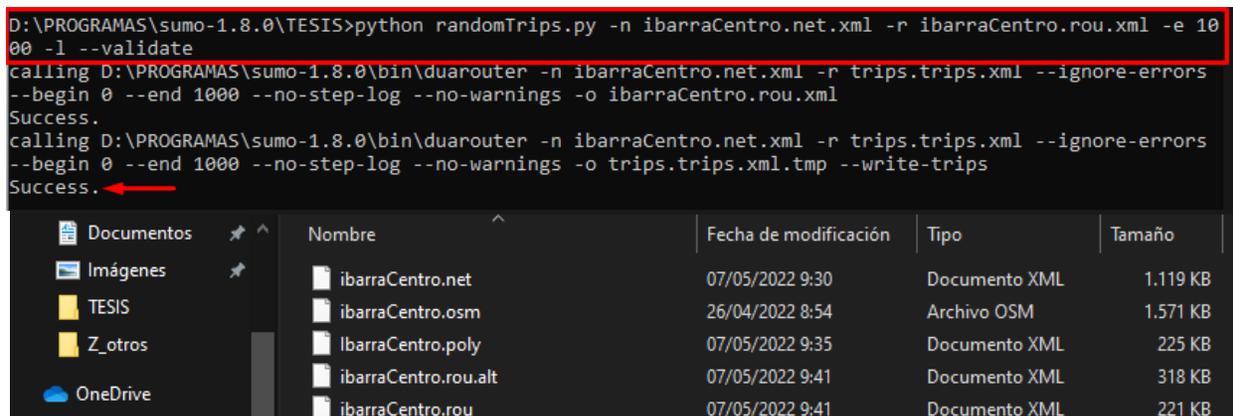
```
D:\PROGRAMAS\sumo-1.8.0\TESIS>polyconvert --net-file ibarraCentro.net.xml --osm-files ibarraCentro.osm --type-file typemap.xml -o IbarraCentro.poly.xml --xml-validation never
Success.
```

The terminal output shows the command was executed successfully, resulting in the creation of the 'IbarraCentro.poly' file, which is also highlighted with a red box in the file explorer.

Una vez generados los datos descritos, es necesario contar con el archivo *randomTrips.py* en el repositorio y a la vez tener disponible Python instalado en el sistema operativo anfitrión para la construcción y ejecución de paquetes SUMO; el archivo *randomTrips.py* permite a partir de intersecciones de inicio y fin, generar un conjunto de rutas de movilidad vehicular aleatorias para la red, estas rutas se almacenan en un archivo *.rou.xml* y *.rou.alt.xml*, en los cuales se establece de forma predeterminada rutas prioritarias y alternativas respectivamente con la hora de inicio en 0 y finalización en 3600 segundos; la línea de comandos usada para este proceso así como la verificación de archivos generados se muestra en la Figura 33.

Figura 33.

Archivos *.rou.xml* y *rou.alt.xml* generados a partir de *.net.xml* para prueba de rutas sobre vías



```
D:\PROGRAMAS\sumo-1.8.0\TESIS>python randomTrips.py -n ibarraCentro.net.xml -r ibarraCentro.rou.xml -e 10
00 -l --validate
calling D:\PROGRAMAS\sumo-1.8.0\bin\duarouter -n ibarraCentro.net.xml -r trips.trips.xml --ignore-errors
--begin 0 --end 1000 --no-step-log --no-warnings -o ibarraCentro.rou.xml
Success.
calling D:\PROGRAMAS\sumo-1.8.0\bin\duarouter -n ibarraCentro.net.xml -r trips.trips.xml --ignore-errors
--begin 0 --end 1000 --no-step-log --no-warnings -o trips.trips.xml.tmp --write-trips
Success.
```

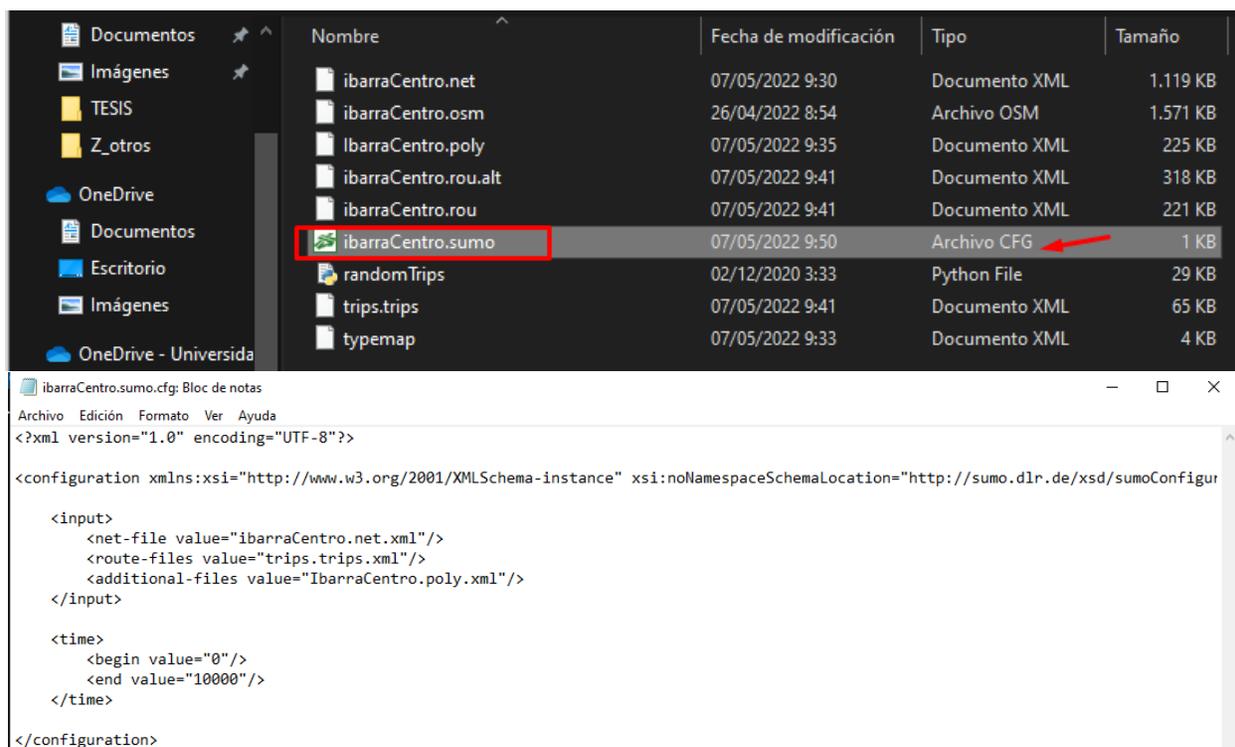
Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
ibarraCentro.net	07/05/2022 9:30	Documento XML	1,119 KB
ibarraCentro.osm	26/04/2022 8:54	Archivo OSM	1,571 KB
ibarraCentro.poly	07/05/2022 9:35	Documento XML	225 KB
ibarraCentro.rou.alt	07/05/2022 9:41	Documento XML	318 KB
ibarraCentro.rou	07/05/2022 9:41	Documento XML	221 KB

Luego de haber obtenido los archivos *ibarraCentro.net*, *ibarraCentro.osm*, *ibarraCentro.poly*, *ibarraCentro.rou.alt* y *ibarraCentro.rou*, es necesario crear un archivo ejecutable *.sumo.cfg* para que pueda ser interpretado por la interfaz gráfica de SUMO, de tal manera que permita la convergencia de todas las condiciones establecidas, mismas que en la simulación se muestran como objetos geométricos y corresponden a intersecciones viales, semaforización, lógica de derecho de paso, extensión de edificaciones dentro de cada cuadra y

manzana, estacionamientos, parques, ríos; entre otros. El ejecutable se crea a partir de los comandos descritos en el bloc de notas que se muestra en la Figura 34, el cual se guarda con la extensión *.sumo.cfg* para que automáticamente sea detectado por el simulador, este permite verificar el funcionamiento de la red vial en base a los archivos creados anteriormente dentro del mismo repositorio.

Figura 34.

Creación de archivo .sumo.cfg para ejecución de simulación sobre entorno gráfico sumo-gui



A continuación para verificar que el archivo *ibarraCentro.sumo.cfg* fue creado de forma correcta, se procede a ejecutarlo, para ello únicamente se da doble clic sobre él y de forma automática se abrirá con la herramienta de software que lo permita, en este caso SUMO; en la Figura 35 se muestra como resultado el mapa geográfico, en este es posible definir rutas y condiciones viales dentro del área limitada; como primer ejemplo de simulación de acuerdo a los

atributos integrados al archivo *.sumo.cfg*, en la Figura 36 se muestra la simulación de movilidad vehicular sobre rutas aleatorias gracias al archivo *.rou.xml* generado anteriormente.

Figura 35.

Área geográfica del centro de la ciudad de Ibarra en software de simulación de movilidad vehicular SUMO

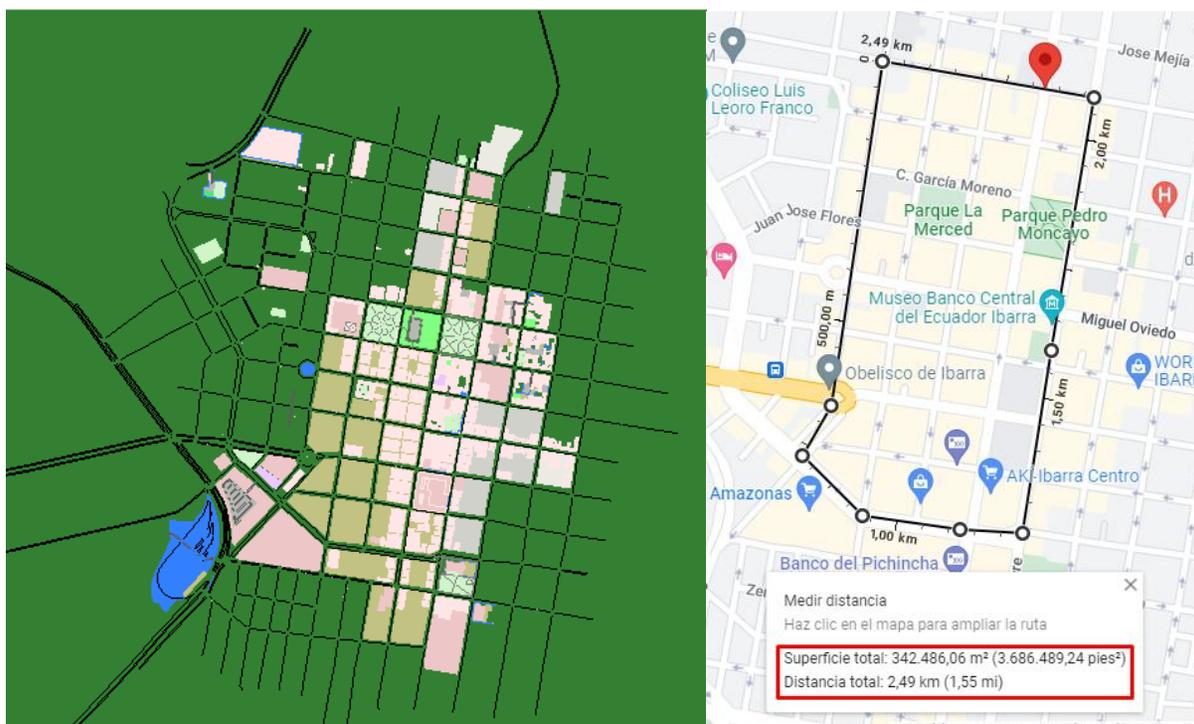
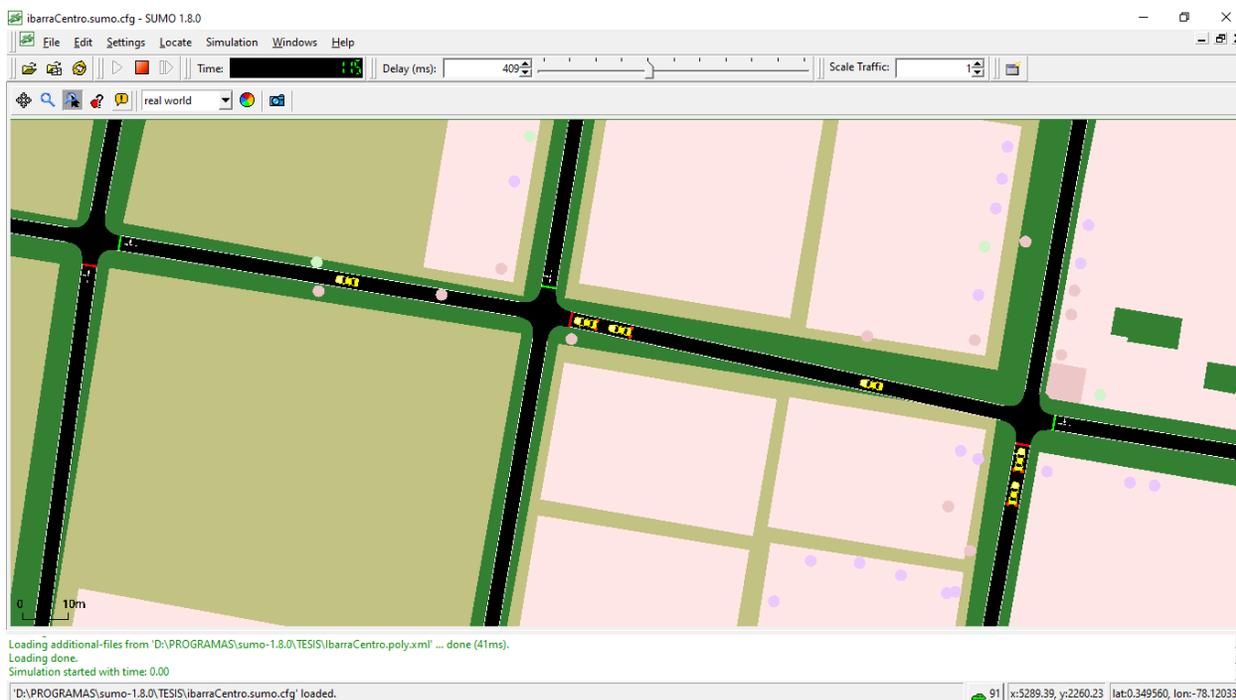


Figura 36.

Validación de archivos generados en simulación de prueba con rutas aleatorias



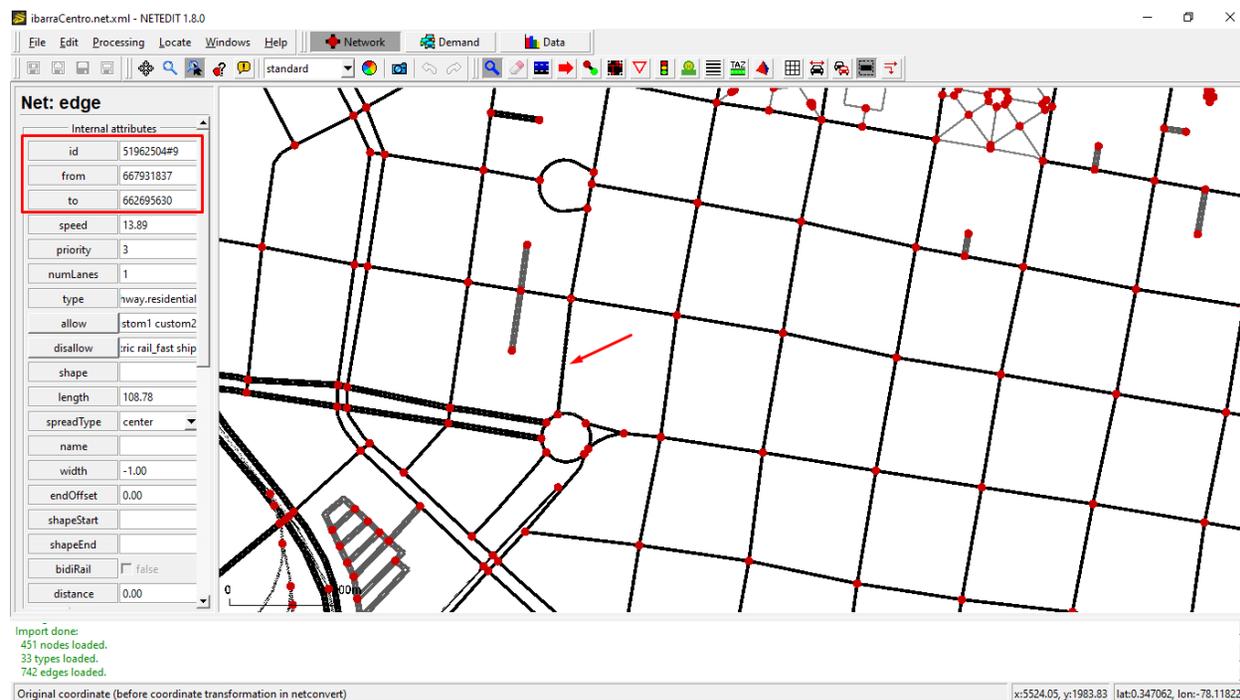
4.1.1.2 Programación de rutas

Una vez generado el mapa y verificado su funcionamiento, se programa las rutas de movilidad de transporte urbano definidas para este estudio de acuerdo con lo indicado por las cooperativas San Miguel de Ibarra y 28 de septiembre.

En este sentido, se abre el archivo *ibarraCentro.net.xml* desde la herramienta complementaria de SUMO, **Netedit**, en la sección **Edge Mode** se verifica el identificador asignado a cada vía al hacer clic sobre ella, tal como se muestra en la Figura 37; este dato está generado por el software y condicionado en función de nodos de partida y llegada correspondiente a intersecciones viales.

Figura 37.

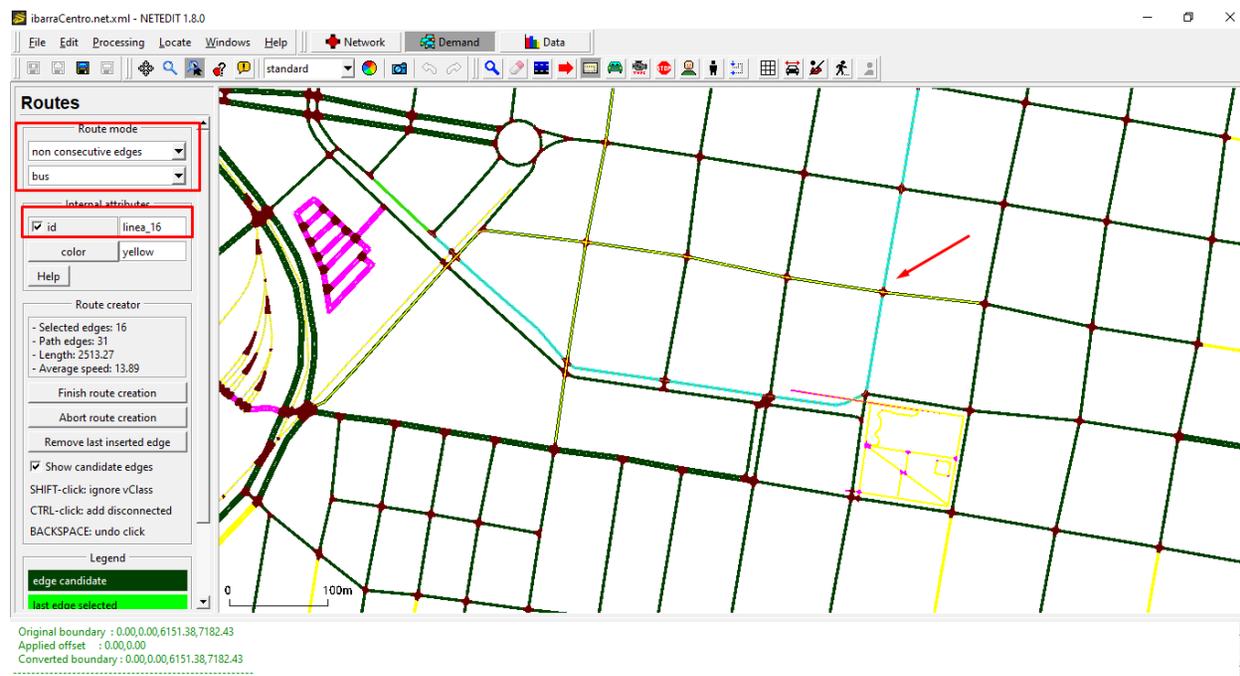
Verificación de identificadores asignados a vías del mapa ibarraCentro.net.xml



A continuación, para la creación de rutas en modo gráfico desde **Netedit**, se abre el modo **Route Mode** desde la pestaña **Edit** y luego se marca en el mapa las vías consecutivas por donde se desea condicionar la ruta, a la cual una vez finalizado su marcado, se le asigna un identificador en el cuadro de parámetros resaltados en rojo a la izquierda de la Figura 38; como evidencia de ello, en el croquis de la Figura 38 se muestra resaltado en color celeste una secuencia vial, esto se aplica para la definición de cada ruta dentro de la zona geográfica a evaluar.

Figura 38.

Programación de rutas en interfaz gráfica de herramienta Netedit > Route Mode



A continuación, se describen las rutas de movilidad vehicular consideradas para este estudio. Cada ruta, conocida como *línea*, se muestra marcada sobre un croquis de la zona geográfica a evaluar. Estas rutas, en base al proceso antes descrito en las Figuras 37 y 38, cuentan con su respectivo algoritmo programado en XML para permitir su simulación. Dicho conjunto de algoritmos se encuentra detallados en el script correspondiente del repositorio descrito en el ANEXO D sección “rutas vehiculares SUMO”; en este se especifica el flujo vehicular, el cual, con el fin de simular un entorno aproximado a las condiciones reales, ha sido establecido de acuerdo los horarios de circulación del transporte público durante los días de la semana.

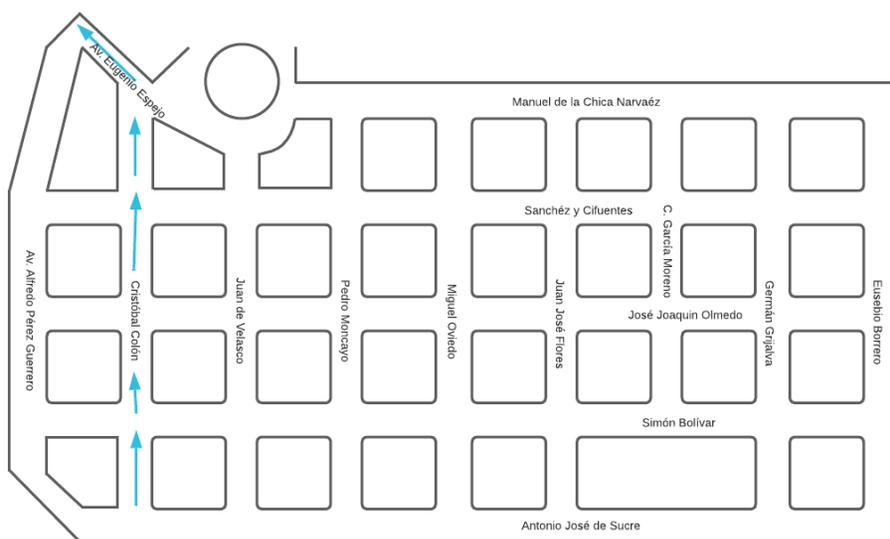
Cooperativa 28 de Septiembre

- Línea 11: Santa Rosa Los Ceibos

Como primera ruta a programar se considera la línea 11 de la Cooperativa 28 de Septiembre, la cual tiene como objetivo brindar a la ciudadanía un recorrido constante a través de varios sectores de la ciudad de Ibarra desde el barrio Santa Rosa del Tejar hasta el barrio Los Ceibos, su trayectoria comprende entre algunas calles de la ciudad; para este estudio se considera la evaluación de desempeño de comunicación de una unidad móvil es su paso por la calle Cristóbal Colón, la cual se encuentra resaltada en color celeste en el croquis de la Figura 39, esta cuenta con un recorrido de 460 metros partiendo desde su intersección con la Av. Antonio José de Sucre hasta la intersección con la Avenida Eugenio Espejo y Avenida Alfredo Pérez Guerrero

Figura 39.

Programación de ruta Linea11 en SUMO

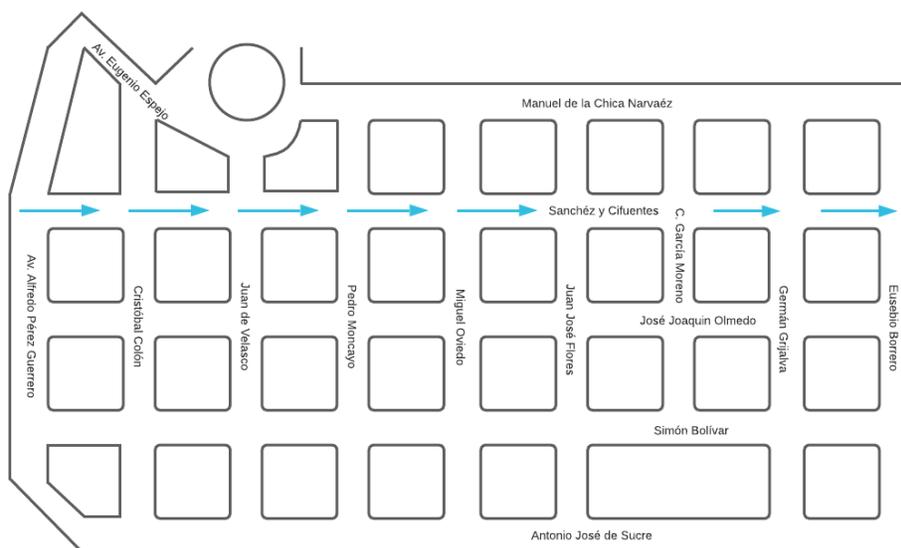


- Línea 12: San Francisco Universidades

La línea 12 es otra ruta que atraviesa una longitud de 900 metros por la calle Sánchez y Cifuentes dentro de la zona delimitada para el presente estudio como se muestra en la Figura 40, su trayecto total corresponde a un recorrido por la parroquia San Francisco hasta las Universidades Católica y Técnica del Norte, beneficiando así en gran medida a la comunidad universitaria de la zona.

Figura 40.

Programación de ruta Linea12 en SUMO



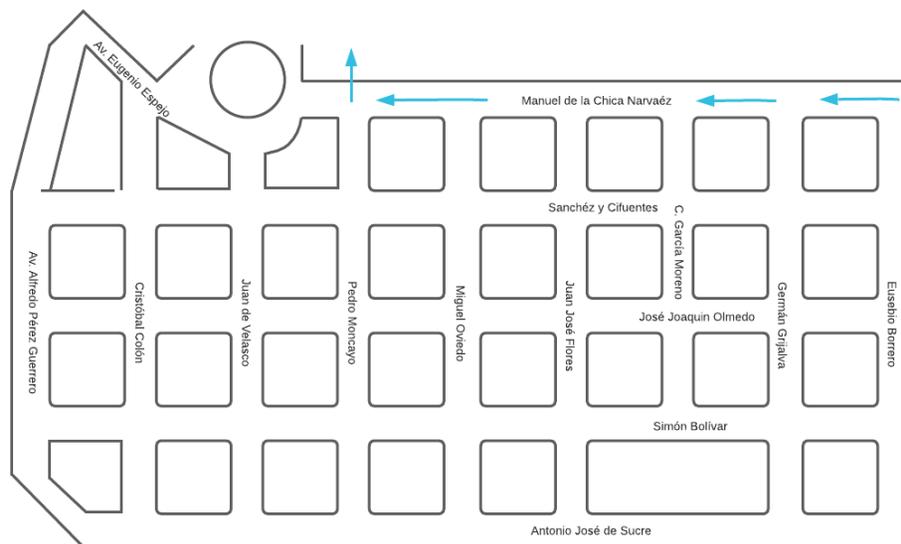
- Línea 13: Las Palmas Guayaquil de Alpachaca

Por parte de la línea 13 de la Cooperativa 28 de Septiembre se tiene un recorrido total desde el barrio Las Palmas hasta el barrio Guayaquil de Alpachaca, permitiéndose un paso en dirección Norte – Sur a través de la calle Manuel de la Chica Narvaéz dentro de la zona delimitada en este

proyecto como se muestra en la Figura 41, su distancia recorrida para efectos de evaluación de transmisión de datos desde unidades móviles es de 575 metros.

Figura 41.

Programación de ruta Lineal3 en SUMO

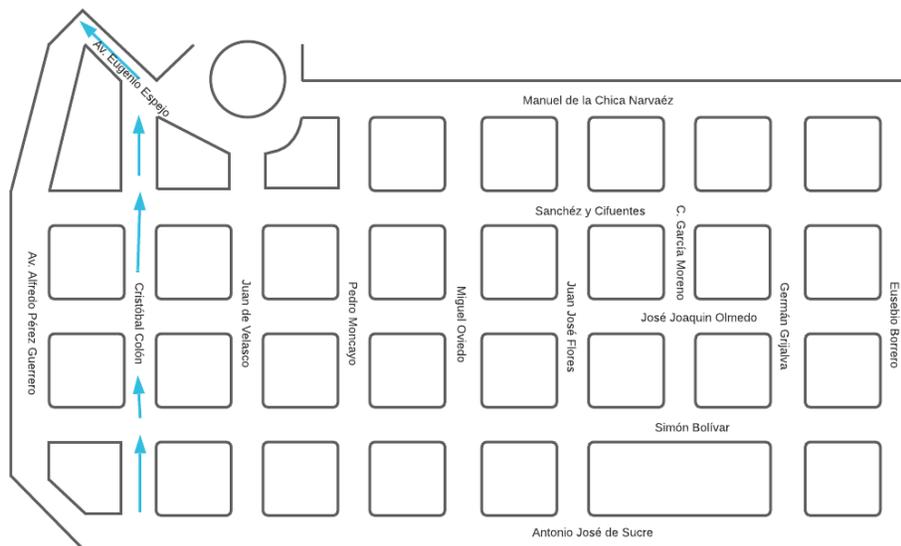


- **Línea 14: Pugacho Huertos Familiares**

De manera similar a la línea 11, la línea 14 tiene un paso a través de la calle Cristóbal Colón en su trayecto desde el barrio Pugacho hacia el sector Huertos Familiares, por lo que se tomará para evaluación la distancia recorrida de 460 metros dentro de la zona delimitada en este estudio, su trayecto referencial se muestra en la Figura 42.

Figura 42.

Programación de ruta Linea14 en SUMO

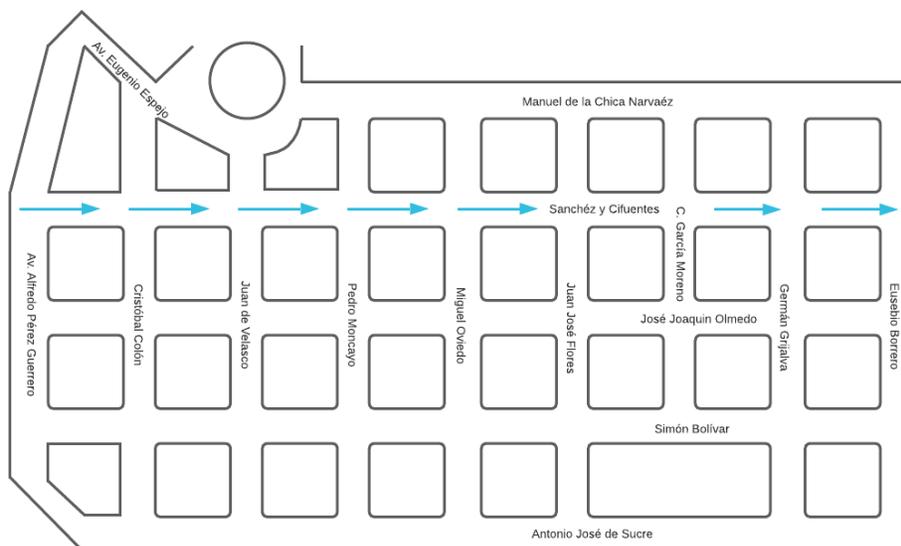


- Línea 15: Caranqui Aduana

La línea 15 cuenta con un recorrido a través de la ciudad de Ibarra en sentido Sur – Norte desde el sector emblemático de Caranqui hacia la Aduana ubicada en la entrada Norte de la ciudad, cerca de la Laguna de Yahuarcocha, su fragmento de ruta considerado para este estudio tiene su paso a través de la calle Sánchez y Cifuentes dentro de la zona delimitada, por lo que al igual que para la línea 12 se considera una distancia de 900 metros como se muestra mapeado la Figura 43.

Figura 43.

Programación de ruta Linea15 en SUMO

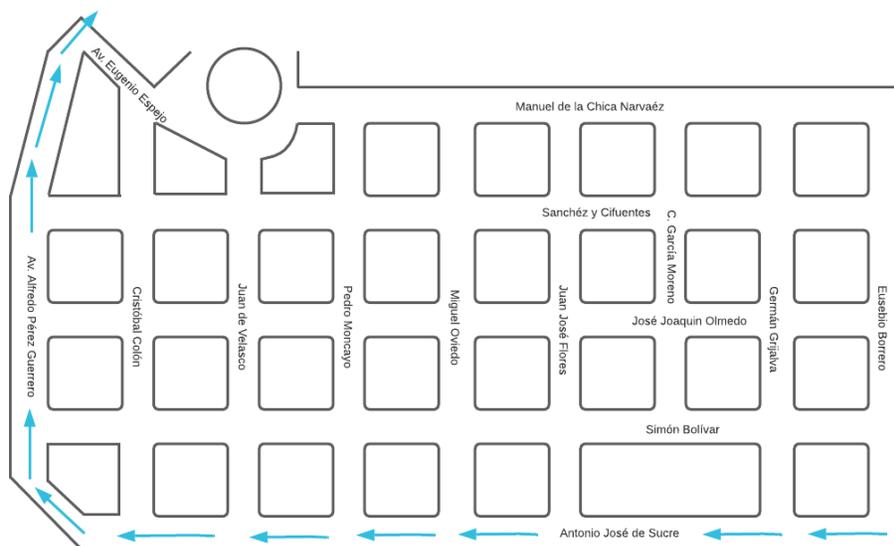


- Línea 16: Yahuarcocha Milagro

La línea 16 define un recorrido Noreste – Suroeste para beneficio de la ciudadanía Ibarreña, dicho trayecto permite a la población movilizarse desde el sector Yahuarcocha hacia el barrio Milagro, con paso por la zona central de la ciudad, misma que es de gran afluencia debido a la actividad comercial que se vive a diario; para efectos de este estudio la circulación de la línea 16 en la zona delimitada corresponde a la calle Antonio José de Sucre y Avenida Alfredo Pérez Guerrero como se muestra mapeado en la Figura 44.

Figura 44.

Programación de ruta Linea16 en SUMO

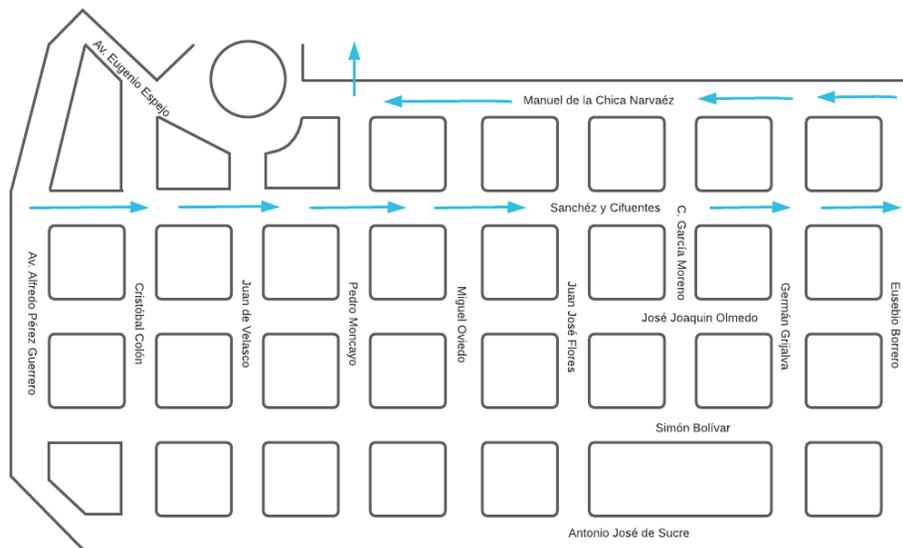


- Línea 19: Chorlaví La Victoria

Finalmente, por parte de la Cooperativa 28 de Septiembre se cuenta con la línea 19 para evaluación de transmisión de datos de ubicación de unidades de transporte público, dicha línea cuenta con su ruta en sentido Sur – Norte dentro de la ciudad de Ibarra, donde su recorrido total se genera entre el sector Chorlaví y el barrio La Victoria; para evaluación dentro de la zona delimitada en este proyecto, se define su paso por las calles Sánchez y Cifuentes con distancia de 900 metros, y Manuel de la Chica Narváez con distancia de 575 metros como se muestra a manera de referencia en la Figura 45.

Figura 45.

Programación de ruta Linea19 en SUMO



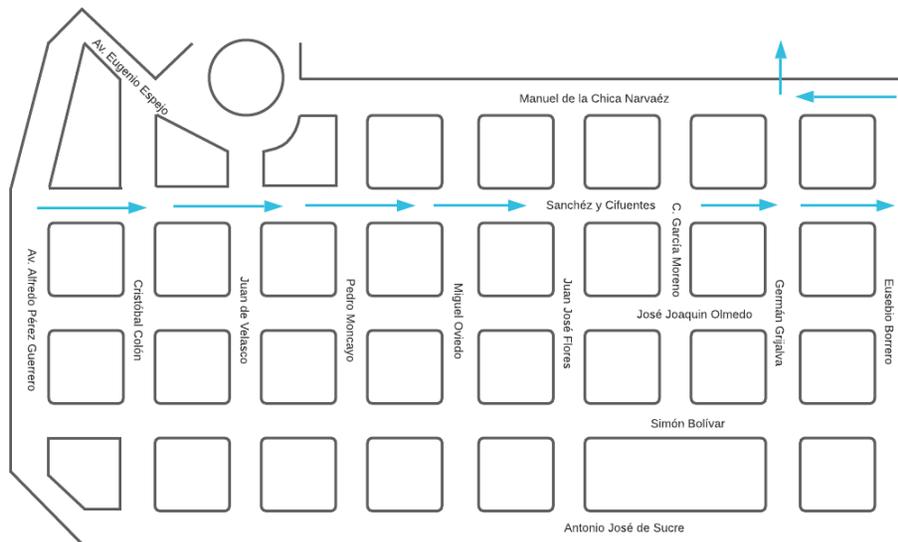
Cooperativa San Miguel de Ibarra

- Línea 03: Ejido de Caranqui Centro

Por parte de la Cooperativa San Miguel de Ibarra se presenta rutas programadas en el software de movilidad SUMO bajo el mismo enfoque que para la Cooperativa 28 de Septiembre, considerando su paso por la zona delimitada para este estudio; a continuación en la Figura 46 se muestra la trayectoria de la línea 03 correspondiente a la ruta que abarca un recorrido desde el barrio Ejido de Caranqui hasta la zona central de la ciudad, misma que se considera de gran afluencia comercial; su distancia recorrida dentro del área a evaluar es de 900 metros a través de la calle Sánchez y Cifuentes, y 175 metros por la calle Manuel de la Chica Narvaéz con desvío por la calle Germán Grijalva y Eloy Alfaro.

Figura 46.

Programación de ruta Linea03 en SUMO

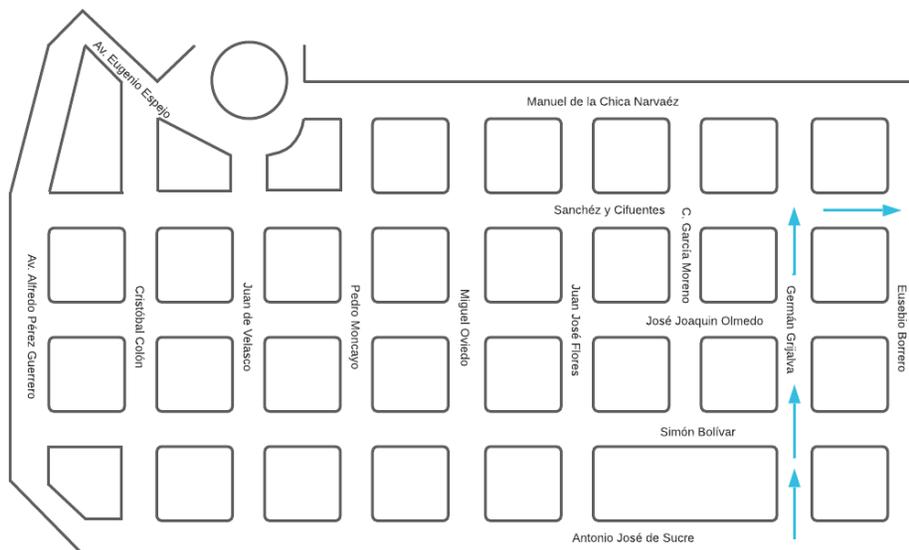


- Línea 04: Caranqui Estadio Las Palmas

Por parte de la línea 04 se cuenta con un recorrido desde el barrio Caranqui hasta el Estadio Las Palmas a través de la zona central de la ciudad de Ibarra por la calle Germán Grijalva con desvío en sentido Sur – Norte por la calle Sánchez y Cifuentes con una distancia a evaluar de alrededor de 460 metros dentro de la zona delimitada para el presente estudio como se muestra mapeado en la Figura 47.

Figura 47.

Programación de ruta Linea04 en SUMO

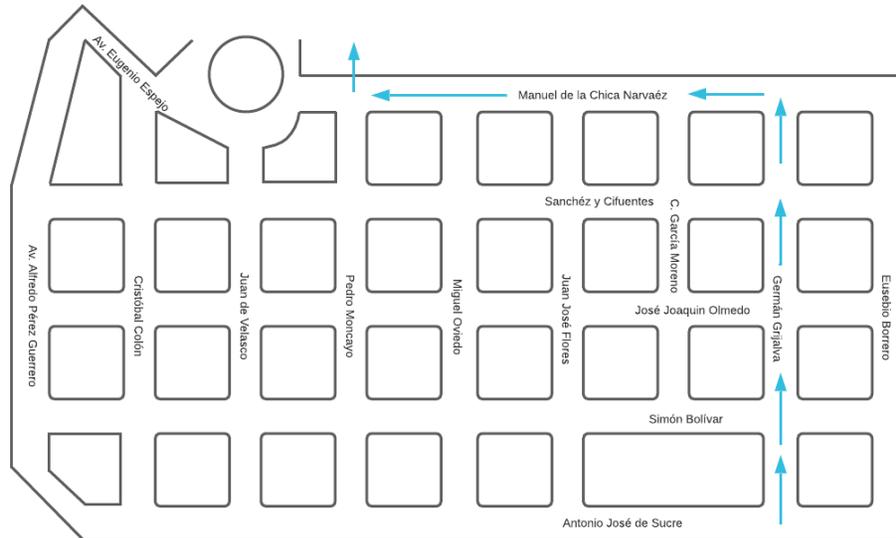


- Línea 10: Caranqui Universidades

Finalmente se considera la línea 10 como fundamental para evaluación de transmisión de datos de ubicación durante la movilidad vehicular, dicha línea abarca un trayecto desde el sector de Caranqui hacia las universidades Católica y Técnica del Norte, pasando por la zona central de la ciudad de Ibarra definida en la zona delimitada en la Figura 48, su paso por dicha zona se da a través de la calle Germán Grijalva hasta la calle Manuel de la Chica Narváez con desvío por la calle Pedro Moncayo, registrando una distancia de 930 metros de acuerdo al opción *Medir distancias y superficies* de Google My Maps.

Figura 48.

Programación de ruta Linea10 en SUMO



Una vez creadas las rutas sobre un archivo *.rou.xml* a partir del archivo principal de características geográficas *.net.xml* y *.poly.xml* para elementos referenciales, estos deben asociarse a un ejecutable *.sumo.cfg* de SUMO como se muestra en la Figura 49 para a posterior exportarse a OMNET++ y ejecutar el modo servidor cliente mediante la librería TraCI por el puerto TCP 9999, de esta forma las condiciones de movilidad se podrán evaluar en conjunto con equipos de red simulados.

Figura 49.

Archivo ibarraCentro.sumo, cfg generado

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>

<configuration xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation="http://sumo.dlr.de/xsd/sumoConfiguration.xsd">

  <input>
    <net-file value="ibarraCentro.net.xml"/>
    <route-files value="ibarraCentro.rou.xml"/>
    <additional-files value="IbarraCentro.poly.xml"/>
  </input>

  <time>
    <begin value="0"/>
    <end value="10000"/>
  </time>

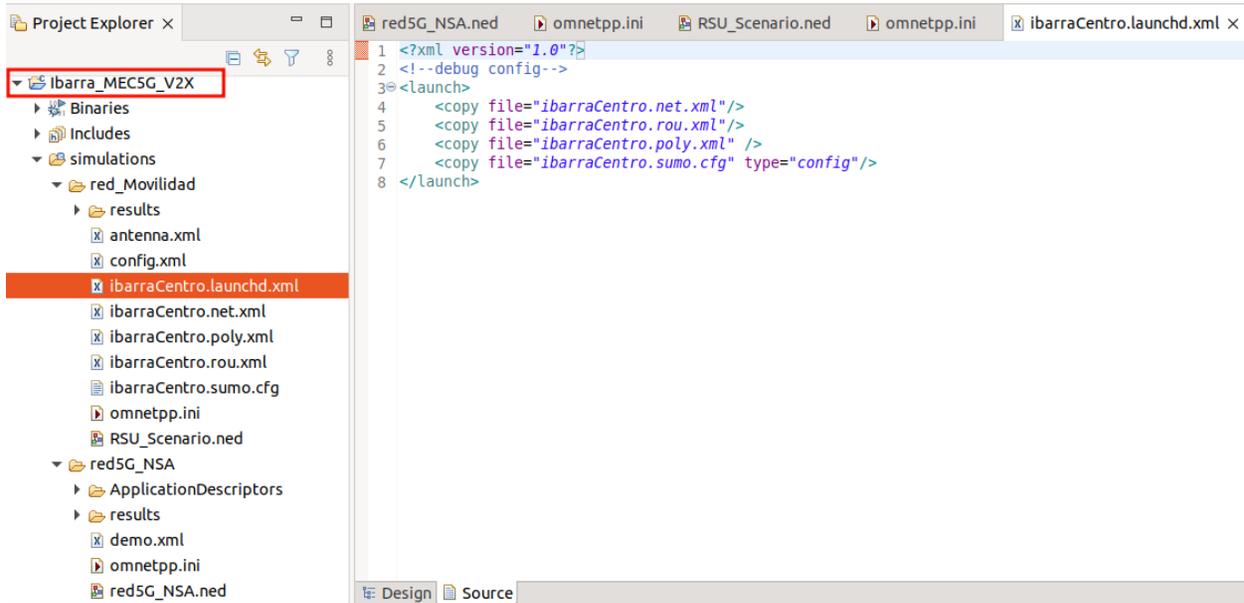
</configuration>
```

4.1.2 Integración de componentes de red sobre software

Una vez que se cuenta con las rutas vehiculares mapeadas, es necesario condicionar la red que va a dar tratamiento a dicha información, para ello se procede con la estructuración de la arquitectura de red propuesta sobre el software de simulación seleccionado, en este caso Omnet++ v.6.0, el cual para efectos prácticos opera sobre un sistema operativo Linux (Ubuntu 20.04 LTS) a razón de compatibilidad de librerías y funciones requeridas para la ejecución de pruebas; en dicho simulador se debe crear un nuevo proyecto y realizar la importación de archivos generados anteriormente en SUMO v.1.8.0 para la simulación del entorno de movilidad vehicular, para ello se debe copiar todos los archivos en la carpeta del proyecto y asociarlos a un script de ejecución de atributos *.launchd.xml* como se muestra en la Figura 50.

Figura 50.

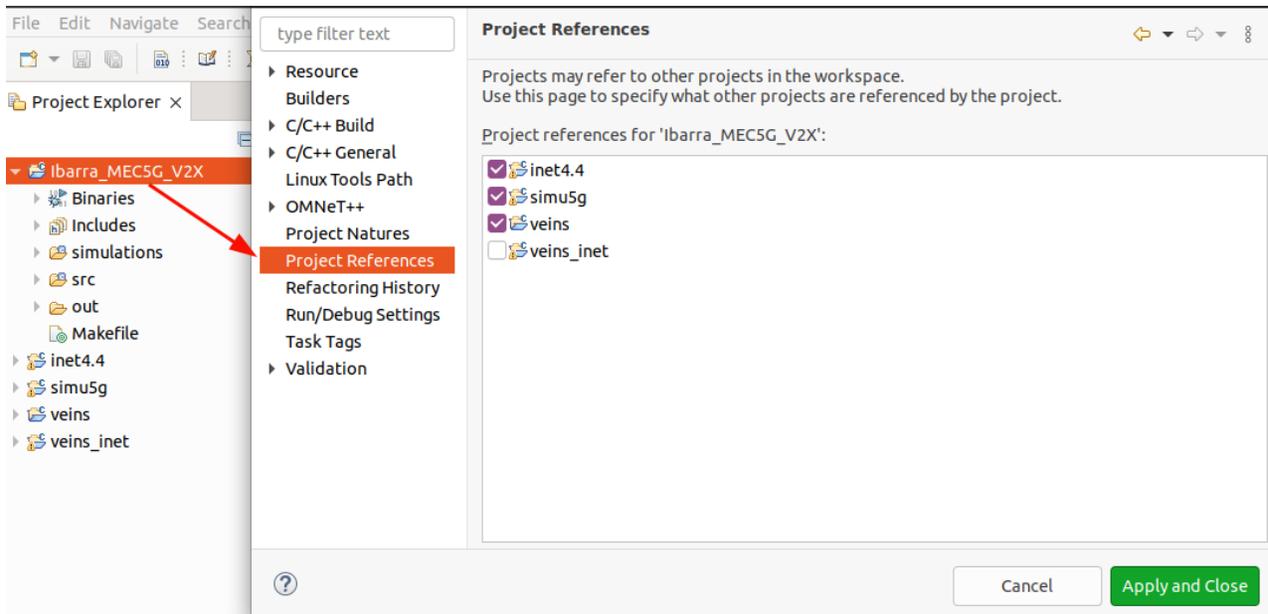
Creación de nuevo proyecto en Omnet++ v.6.0 (Linux Ubuntu 20.04 LTS), y asociación de atributos generados en SUMO v.1.8.0 (Windows 10)



Como siguiente paso, es necesario tomar como referencias de paquetes a Simu5G, INET y VEINS previamente importados a Omnet++ para tomar módulos y submódulos que condicionaran la infraestructura V2X/MEC/5G NSA, dichos paquetes se instalan en sus versiones más estables para asegurar la convergencia de la red; para ello se debe dar clic derecho sobre el ***Ibarra_MEC5G_V2X*** > ***seleccionar propiedades*** > ***Project References*** y marcar los paquetes mencionados inicialmente, por último se escoge ***Apply and Close*** para guardar los cambios; dicho proceso se muestra en la Figura 51.

Figura 51.

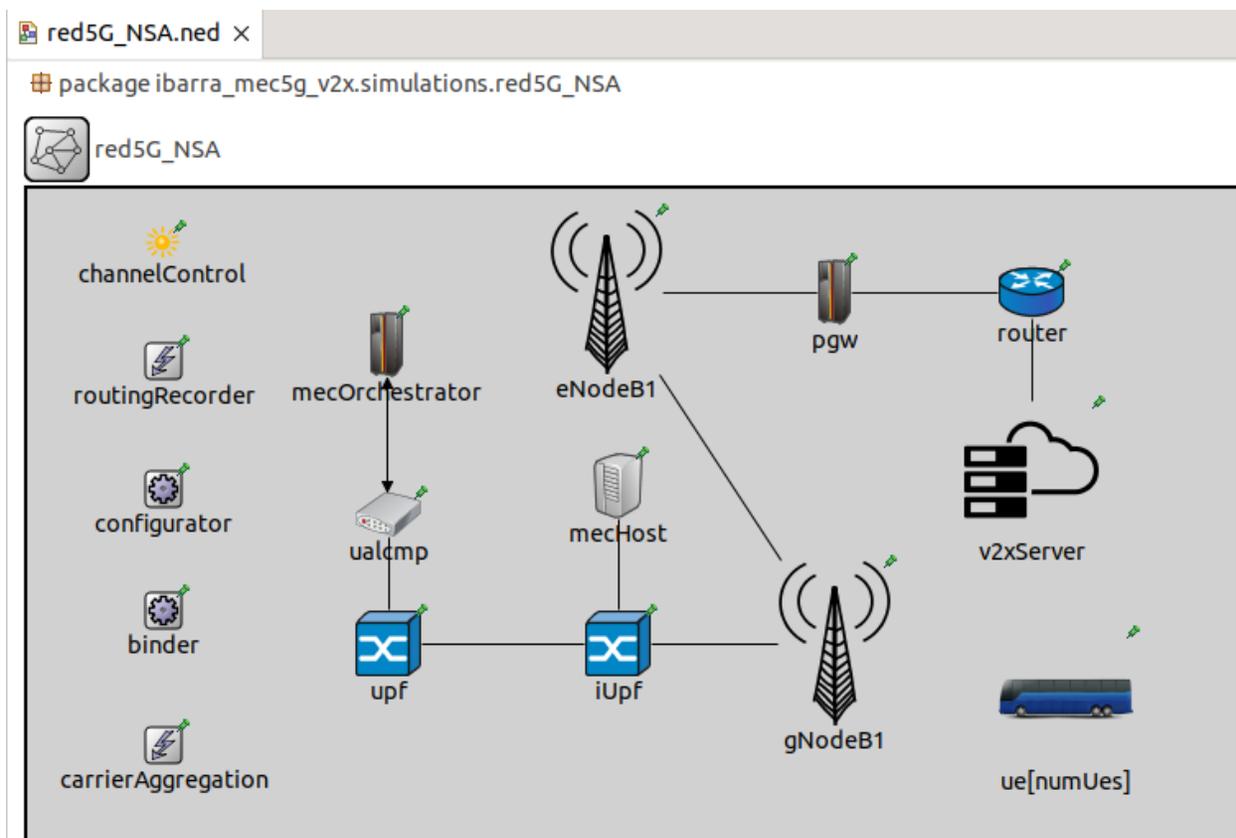
Referenciación de nuevo proyecto creado



A continuación se procede con la creación de la red, iniciando por su topología física condicionada sobre un archivo *.ned*, en el que se establece las condiciones de comunicación entre elementos de hardware, mismos que son tomados de paquetes preconfigurados, dicha red tiene un nombre definido para ser tomado como referencia de ejecución en el archivo *omnet.ini*, en este caso se denomina red5G_NSA; la topología se crea a partir de la selección de módulos y submódulos desde la parte derecha de la interfaz de Omnet++, estos deben ser arrastrados hacia el espacio de trabajo para posteriormente condicionar sus parámetros en el script de ejecución *.ini*; en la Figura 52 se muestra la red de comunicación estructurada y su código fuente en el ANEXO D.

Figura 52.

Red de comunicación estructurada sobre Omnet++ v.6.0



Cada uno de los elementos disponibles en la red cuenta con interfaces de comunicación y funciones únicas, cuyos parámetros deben ser condicionados en base a la demanda de tráfico esperada para luego evaluar el rendimiento de la red, para ello a continuación se muestra a detalle los segmentos más relevantes de la programación de arranque definida en el script *omnet.ini* para cada una de las etapas, y como estas se comunican con sus procesos adyacentes.

Siguiendo el orden lógico de las operaciones esperadas en la simulación se cuenta en primer lugar con las condiciones generales, las cuales hacen posible la interacción de librerías y herramientas del simulador Omnet++, esto permite extraer resultados de salida en función de eventos, para ello se cuenta con formatos escalar y vectorial, los cuales se puede habilitar o

deshabilitar de acuerdo a lo que se requiera, en este caso se habilita los dos tipos de salida y se condiciona las repeticiones a 15 iteraciones con el fin de evaluar la transmisión de datos en la red de comunicación estructurada; a continuación en la Figura 53 se muestra el fragmento de código a usar, en donde se habilita la extracción de resultados de la intervención del protocolo de transmisión de control de secuencias SCTP, a fin de obtener resultados concretos con base a velocidades de transmisión y capacidad de flujo de datos sobre la red.

Figura 53.

Atributos programados en el script .ini de Omnet++ para definición de formato de resultados de salida

```
[General]
image-path=../.././images
cmdenv-express-mode = true
cmdenv-autoflush = true
#####
#           FORMATO DE RESULTADOS DE SALIDA           #
#####
num-rngs = 3
repeat = 15
seed-set = ${repetition}
output-scalar-file = ${resultdir}/${configname}/${repetition}.sca
output-vector-file = ${resultdir}/${configname}/${repetition}.vec
**.routingRecorder.enabled = false
**.scalar-recording = true
**.vector-recording = true
**.sctp.**.scalar-recording = true
**.sctp.**.vector-recording = true
```

Por otro lado, es necesario establecer el algoritmo de asignación de recursos físico a la zona de evaluación y tiempo de ejecución de la simulación. Para ello, se definen valores específicos, tales como *playground*, que corresponde al tamaño en metros del área geográfica para implementación de la red de comunicación; *sim-time-limit*, que define la duración de la

simulación; y *warmup-period* que es el periodo de inicialización donde se establecen los primeros resultados de la simulación, los cuales se registran en los vectores de salida. Las líneas de comandos correspondientes a las instrucciones descritas anteriormente se muestran en la Figura 54.

Figura 54.

Atributos programados en el script .ini de Omnet++ para definición de parámetros iniciales de simulación

```
#####
#           PARAMETROS DE SIMULACION #
#####
debug-on-errors = false # depurador C++ desactivado
print-undisposed = true # habilitar información sobre elementos no
designados
sim-time-limit = 38s
warmup-period = 10s
*.playgroundSizeX = 1100m
*.playgroundSizeY = 800m
*.playgroundSizeZ = 50m
```

Una vez que se han definido las dimensiones del entorno, se procede al establecimiento del algoritmo de asignación de recursos lógicos, que tiene como función principal definir procesos de comunicación de datos. Para ello, tanto el eNodeB (4G) como el gNodeB (5G) cuentan con las funcionalidades de control de la estación base y control de radio en la tecnología asociada a cada generación: LTE para la cuarta generación y NR para la quinta generación.

Para que las tecnologías 4G y 5G sean convergentes, es necesario instanciar la capa NR PDCP en el eNodeB. Por parte del gNodeB, esta característica viene por defecto. De esta forma, se obtiene una conectividad dual a nivel lógico, mientras que a nivel físico se hace uso de la interfaz X2 disponible en el simulador, que genera un enlace bajo el protocolo PPP como soporte para su

configuración y operación bajo encapsulación/desencapsulación. A continuación, en la Figura 55 se muestra el fragmento de código correspondiente a lo antes descrito; todo el conjunto de instrucciones lógicas para esta y otras secciones se encuentran disponibles en el repositorio descrito en el ANEXO D, mismo que contiene cada una de las etapas necesarias para llevar a cabo la propuesta de este proyecto.

Figura 55.

Atributos programados en el script .ini de Omnet++ para convergencia de tecnologías 4G y 5G

```
#####
# CONECTIVIDAD DUAL #
#####
*.eNodeB1.nicType = "LteNicEnbD2D"
*.eNodeB1.cellularNic.LtePdcprRrcType = "NRPdcprRrcEnb"
*.gNodeB1.masterId = 1
**.dualConnectivityEnabled = true
## CONFIGURACION X2
*.*B1.numX2Apps = 1      # una x2App por cada par de nodos emparejados
*.*B1.x2App[*].server.localPort = 5000 + ancestorIndex(1) # Puertos de
servidor (x2App[0]=5000, x2App[1]=5001, ...)
*.eNodeB1.x2App[0].client.connectAddress = "gNodeB1%x2ppp0"
*.gNodeB1.x2App[0].client.connectAddress = "eNodeB1%x2ppp0"
```

Tras haber establecido las condiciones de comunicación dual, se procede a definir los parámetros específicos de operación para el espectro de radio, los cuales se encuentran establecidos y definidos bajo comentarios en el fragmento de código que se muestra en la Figura 56.

Figura 56.

Atributos programados en el script .ini de Omnet++ para operación de espectro de radio 4G y

5G

```
#####
#          PARAMETROS ESPECIFICOS NR y LTE          #
#####
*.gNodeB*.cellInfo.broadcastMessageInterval = 0.5s #intervalo de
tiempo en segundos para mandar mensajes de difusión
**.fbPeriod = 40 # período en milisegundos para envío de reportes
CQI (channel quality information)
**.amcType = "NRAMc" #Tipo de control de acceso al medio
**.pilotMode = "ROBUST_CQI" #Modo de transmisión piloto para CQI
**.targetBler = 0.01 #Objetivo del error de transmisión deseado
**.blerShift = 5
**.ueTxPower = 26 #Potencia de transmisión de UE en dBm
**.eNodeBTxPower = 45 #Potencia de transmisión de estaciones base en
dBm
```

Para el establecimiento de los parámetros de operación del espectro de radio de la Figura 56, se considera implícitamente la operación de los equipos inalámbricos en base a celdas con potencias en [dBm], dichos valores se asignan para los UE a través de la condición lógica `** .ueTxPower`, mientras que para las estaciones base NodeB de las tecnologías propuestas 4G y 5G se asignan mediante la condición lógica `** .eNodeBTxPower`; esto en conjunto da lugar a un sistema 5G NSA. En este sentido, tanto para el equipo transmisor como receptor; los valores condicionados son:

- `target BLER`, que es la tasa de error de bloque para simulación de transmisiones de datos periódicas, simulando un entorno urbano casi real
- `NRAMc` como una clase C++ que permite determinar el tipo de control de acceso al medio y por consiguiente;

- TBS, que es la relación de flujo de datos Downlink/Uplink, misma que depende de la operación definida para la banda de frecuencia asignada de 3.5 [GHz] para 5G NSA.

A lo antes mencionado se complementa el modo `ROBUST_CQI` que permite generar reportes de calidad del canal bajo condiciones de operación de todos los equipos de la red y simulación en ambientes de alto ruido e interferencia; este parámetro también puede ser:

- `SIMPLE_CQI` para casos de transmisión con poco ruido e interferencia, donde no se requiere una gran precisión en la medición de la calidad del canal.
- `ADAPTIVE_CQI` para generar una adaptación dinámica en función de las condiciones actuales del canal, útil en entornos con una gran cantidad de ruido e interferencia, donde es importante tener una medición precisa de la calidad del canal
- `FIXED_CQI` para entornos constantes de transmisión de datos, en donde los equipos no se adaptan a las condiciones del canal periódicamente, lo que es útil en entornos con una calidad del canal estable que no requieren realizar ajustes continuos (doc.omnetpp.org, 2021)

Además, se considera la evaluación del nivel de conectividad de cada UE en la celda que cubre el área de prueba, esta cuenta con su cobertura definida bajo niveles de potencia entorno a las necesidades geográficas del servicio propuesto; en el fragmento de código que se muestra en la Figura 57 se condiciona los parámetros de asociación del grupo de usuarios a la estación base o NodeB que centraliza la comunicación en la celda, para ello se establece el ID de la estación base y el del grupo de usuarios bajo el mismo valor de orden, ya que esto permite la asignación de

recursos al mismo tiempo, es decir todos los elementos de red que tengan un ID 1 se ejecutaran con mayor prioridad que los que tengan un ID 2; su parametrización es la siguiente, cada una de las líneas de código explica su función dentro de la propuesta.

Figura 57.

Atributos programados en el script .ini de Omnet++ para la definición de parámetros de asociación del grupo de usuarios UE a las estaciones base eNodeB y gNodeB

```

**.ue[*].masterId = 1 #Identificador maestro para todas las UE en la
configuración 4G
**.ue[*].macCellId = 1 #Identificador de celda MAC (media Access
control) para todas las UE dentro de la red 4G, la celda es una unidad
de organización de la red móvil, es controlada por un nodo MAC
**.ue[*].nrMasterId = 1 Identificador maestro para todas las UE en la
configuración 5G
**.ue[*].nrMacCellId = 1 1 #Identificador de celda MAC (media Access
control) para todas las UE dentro de la red 5G
**.gNodeB1.macCellId = 1 #Identificador de celda MAC para gNodeB
**.gNodeB1.macNodeId = 1 #Identificador de nodo MAC para gNodeB,
responsable de gestión de acceso a medios de transmisión, asignación
de recursos, gestión de congestión y detección de colisiones.

```

Todo el proceso de tratamiento de datos definido hasta el momento depende de paquetes simulados con una tasa de 12[Mbps], esto se justifica con mayor detalle en la Tabla 11 en conjunto con todos los parámetros de operación de la red, además se implementa condiciones de movilidad de usuario de 10 [mps] (metros por segundo), valor que fue tomado de ejemplos de simulación de redes vehiculares en Omnet++ como capacidad de transmisión de información a través del espectro para un vehículo en movimiento que circula a la velocidad limite (50 Km/h) en zonas urbanas de la ciudad de Ibarra según lo especificado por la normativa vigente de la Agencia Nacional de Transito; en el fragmento de código que se muestra en la Figura 58 se define una posición vehicular específica dentro del área de trabajo donde está construida la topología de red física propuesta para

la simulación, además, se establece los grados de movimiento inicial en 90°, es decir los vehículos se moverán hacia el norte a 10[mps] simulando así un entorno de congestión vehicular con circulación a baja velocidad.

Figura 58.

Atributos programados en el script .ini de Omnet++ para definición de posición vehicular específica dentro del área de trabajo en el entorno de simulación

```

**.numUes = 1
**.ue[0].mobility.initialX = 650m #coordenadas iniciales de usuario en
plano 2D eje x
**.ue[0].mobility.initialY = 250m #coordenadas iniciales de usuario en
plano 2D eje y
**.ue[0].mobility.initialMovementHeading = 90deg
**.ue[0].mobility.speed = 10mps #velocidad de usuario movil dentro de
zona urbana

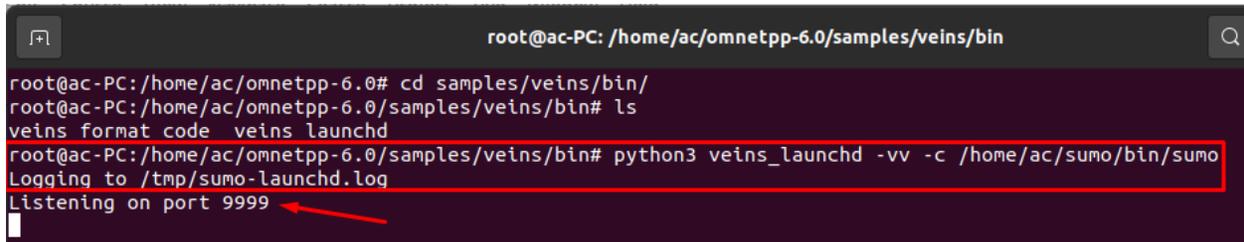
```

Como complemento a la parametrización de la red, se establecen condiciones de programación de cada uno de los servicios ETSI MEC, mismos que se encuentran detallados en los archivos fuente publicados en el repositorio descrito en el ANEXO D.

A continuación se requiere de forma esencial la librería TraCI (Traffic Control Interface) para la ejecución simultánea de la red de movilidad vehicular y la red de transporte de información; esta fue previamente instalada con el constructor de SUMO sobre Linux; para proceder con su uso se activa el puerto TCP 9999 desde la consola de comandos del sistema operativo usado, por consiguiente, SUMO y VEINS (Omnet++) funcionan como servidor cliente y dicha interacción se ejecuta sobre el simulador en base a los parámetros asignados; la ejecución del comando respectivo se muestra resaltado en la Figura 59, para ello se requiere estar dentro del repositorio VEINS disponible en los samples de Omnet++.

Figura 59.

Activación de puerto TCP 9999 mediante librería TraCI



```

root@ac-PC: /home/ac/omnetpp-6.0/samples/veins/bin
root@ac-PC:/home/ac/omnetpp-6.0# cd samples/veins/bin/
root@ac-PC:/home/ac/omnetpp-6.0/samples/veins/bin# ls
veins format code  veins launchd
root@ac-PC:/home/ac/omnetpp-6.0/samples/veins/bin# python3 veins_launchd -vv -c /home/ac/sumo/bin/sumo
Logging to /tmp/sumo-launchd.log
Listening on port 9999

```

4.2 Operación del sistema

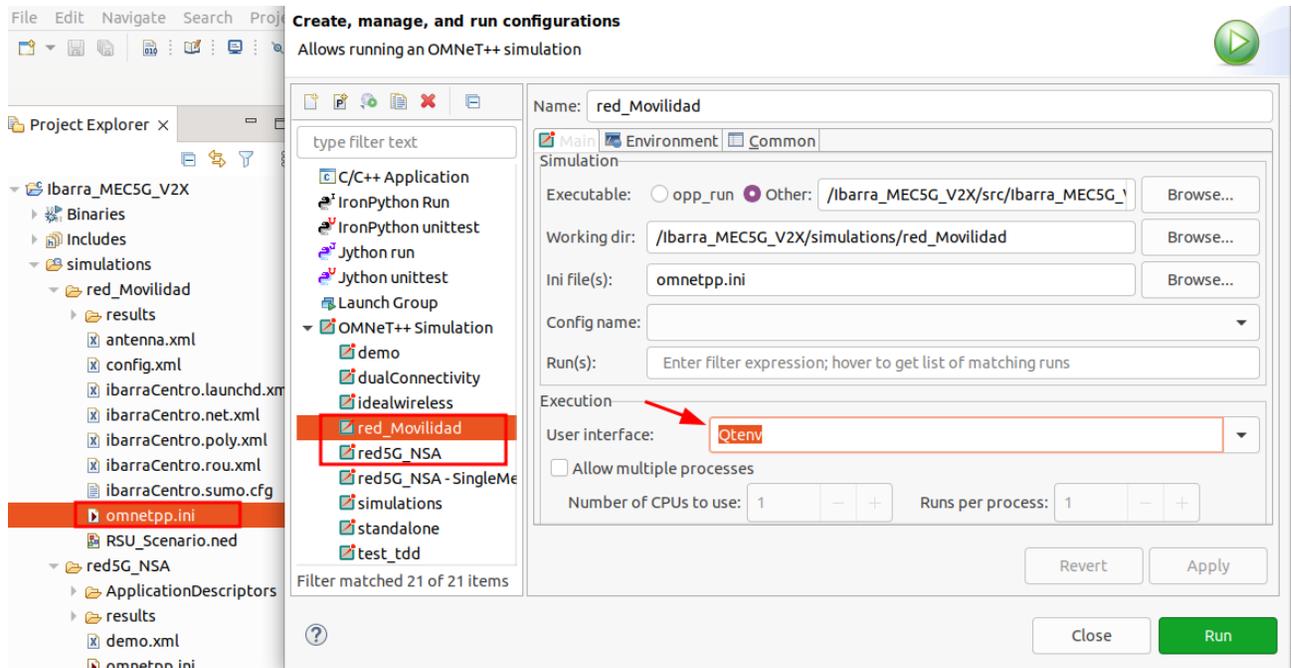
Tras haber realizado las configuraciones necesarias en los scripts de inicialización *omnet.ini* tanto para la red de generación como para la red de tratamiento de datos, se procede a ejecutar cada uno de los escenarios de simulación y posteriormente a analizar los resultados obtenidos como a continuación se indica; para ello se muestra en la sección **4.2.1** el proceso de ejecución de los escenarios de simulación planteados, esto sirve como soporte para la comprensión de los pasos a seguir en el simulador Omnet++ de tal forma que se obtengan archivos de resultado que permitan interpretar métricas de rendimiento en la red, mismos que se muestran en la sección **4.2.2** conjuntamente con su análisis respectivo.

4.2.1 Proceso de ejecución de simulación y obtención de resultados

Este proceso parte de la selección del script *omnet.ini*, al cual se debe dar clic derecho para acceder al menú de opciones desplegable, en donde se selecciona **Run As > Omnet++ Simulation**; para este paso se puede verificar la existencia de diferentes entornos gráficos de simulación que incluye Omnet++, como son *Cmdenv* y *Qtenv*, en este caso se hace uso de *Qtenv* debido a su versatilidad y bajo uso de recursos para la ejecución de pruebas de forma rápida, su selección se realiza dentro de **Run Configurations** tal como se muestra en la Figura 60.

Figura 60.

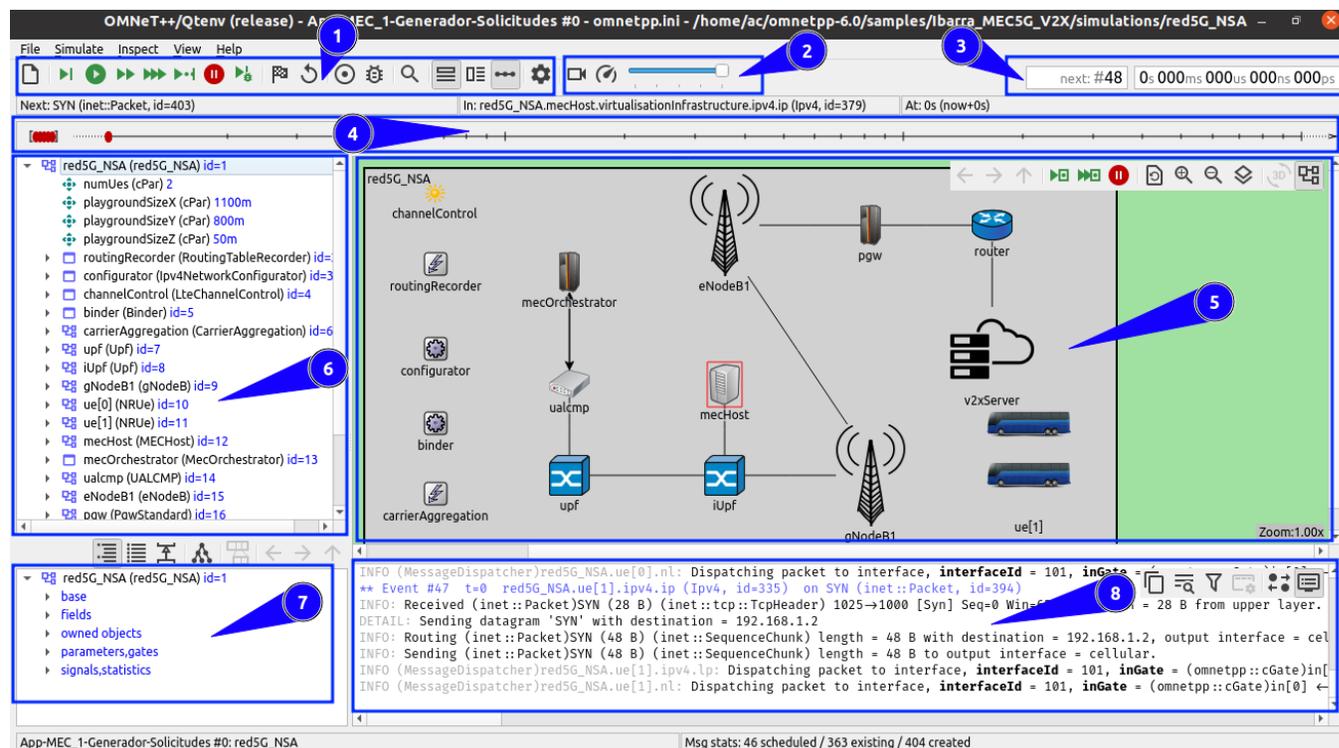
Ventana de selección de entorno de simulación (Qtenv o Cmdenv)



Como complemento a los antes mencionado, en base a la Figura 61 se da a conocer los componentes del ambiente de simulación *Qtenv* y de forma consecutiva se detallan de acuerdo con el manual del simulador Omnet++ v6.0 disponible en su sitio oficial.

Figura 61.

Componentes del entorno de simulación Qtenv



1. Barra de herramientas: Permite acceder a las funciones más utilizadas, como paso a paso, ejecutar y detener la simulación.
2. Velocidad de animación: A manera de control deslizante al final de la barra de herramientas, permite escalar la velocidad de las animaciones.
3. Número de evento y tiempo de simulación: estas dos etiquetas en el extremo derecho de la barra de herramientas muestran el número de evento del último evento ejecutado o el siguiente evento futuro, y el tiempo actual de simulación. El formato de visualización se puede cambiar desde el menú contextual.
4. Línea de tiempo: muestra el contenido del conjunto de eventos futuros (FES) en un tiempo logarítmico escalar.

5. Pantalla de Red: Muestra la red o cualquier módulo gráficamente, aquí también tiene lugar la animación.
6. Navegador de objetos: muestra la jerarquía de objetos en la simulación actual y en la FES.
7. Inspector de objetos: muestra el contenido y las propiedades del objeto seleccionado.
8. Visor de registros: Muestra el registro de paquetes o mensajes enviados entre módulos, o registra los mensajes emitidos por los módulos durante la simulación (doc.omnetpp.org, 2021, p. 67-68).

En este sentido, tras dar clic en *Run As > Omnet Simulation* se abre el ambiente de simulación donde se ejecutarán los eventos discretos para cada escenario de red de comunicación, dicho entorno parte de la aparición de un cuadro de diálogo en donde se selecciona el tipo de prueba a ejecutar para cada uno de los escenarios programados; para la red de movilidad vehicular se despliegan las opciones General, Defecto y Balizamiento; a manera de ejemplo en las Figuras 62 y 63 se muestra la selección y ejecución de la configuración general.

Figura 62.

Selección de configuración para red de movilidad vehicular

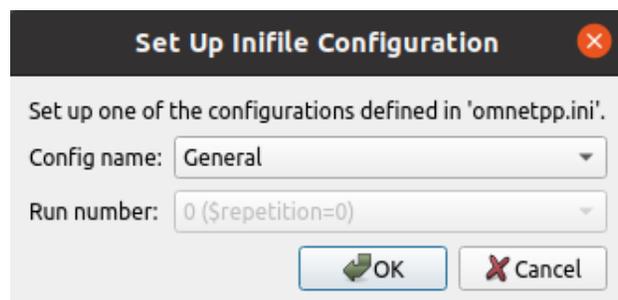
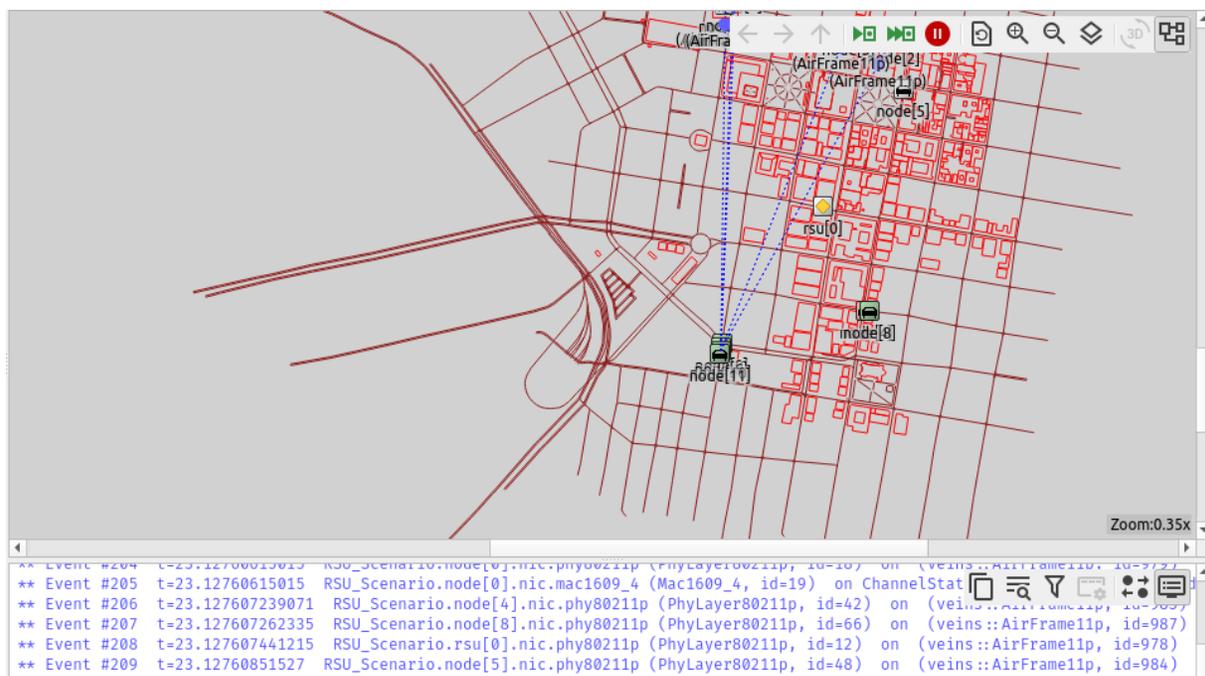


Figura 63.

Verificación de simulación de red vehicular



Por otro lado, para la red de transporte y tratamiento de información denominada 5G NSA se evalúan entornos en función de la capacidad de procesamiento MEC, estos son: Conectividad Dual y Generador de solicitudes para Uplink/Downlink; con el fin de verificar la operatividad del escenario se ejecuta la opción Conectividad Dual, de esta forma se puede apreciar su animación como se muestra en las Figuras 64 y 65.

Figura 64.

Selección de configuración para red de tratamiento de datos

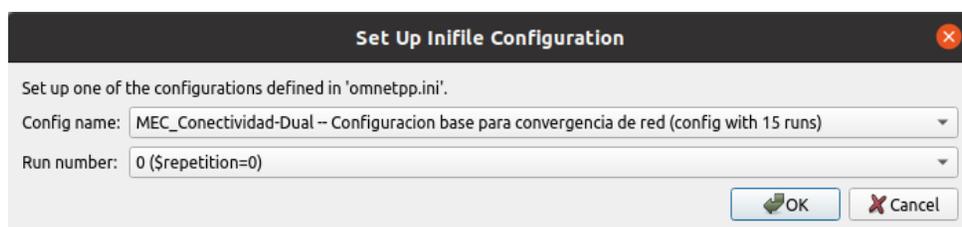
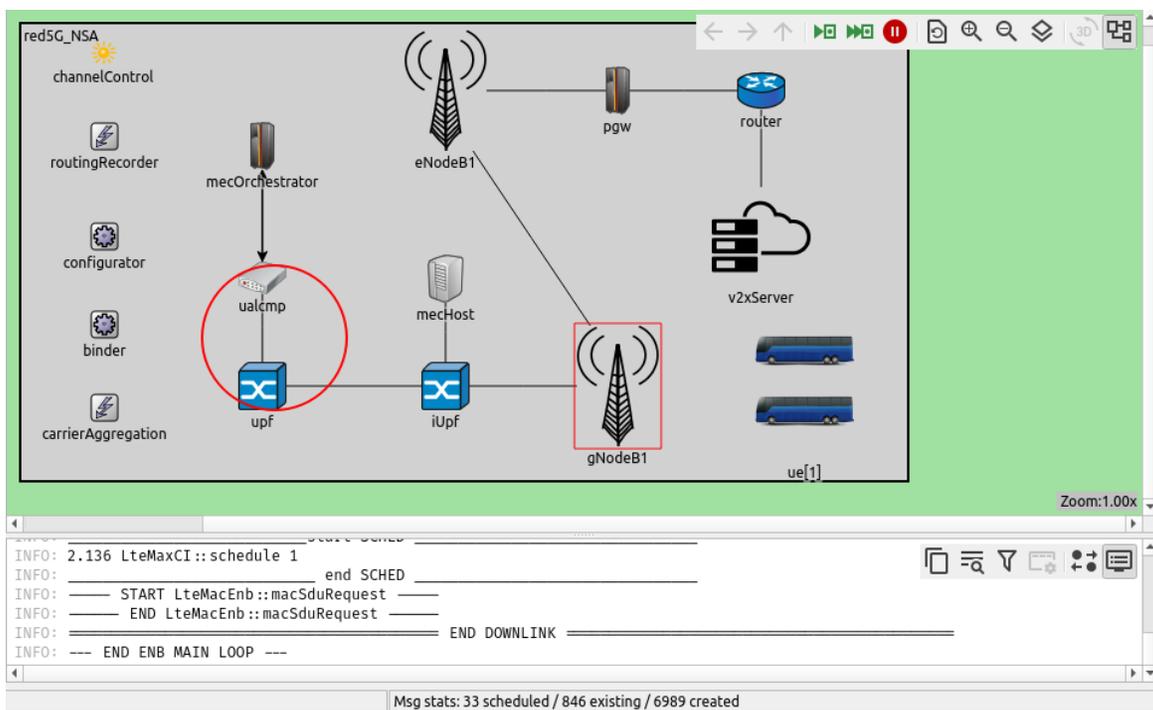


Figura 65.

Verificación de simulación de conectividad dual operativa



La ejecución de una opción determinada en cualquiera de los escenarios de simulación permite apreciar la interfaz del entorno *Qtenv*, en donde en la parte inferior conocida como visor de registros se muestra cada uno de los eventos discretos que se dan en función de módulos y submódulos de la red, tales como la generación, envío y recepción de solicitudes de conectividad; acuses de recibo, intercambio de tramas y paquetes a nivel de cada capa operativa; movimiento de elementos de red y estado de los mismos, entre otros.

Al poner en marcha la simulación, con el fin de evaluar resultados, se puede optar por seleccionar el icono REC para grabar las interacciones entre elementos de red y extraer un diagrama de secuencias en función de tiempos; además, al terminar la simulación verifica la creación de los archivos *.vec* y *.sca*; en donde se guardan resultados en forma de vectores y

escalares respectivamente; cualquiera de estos últimos permite la creación de un archivo **.anf** únicamente al dar clic sobre él, este archivo de análisis contiene la información generada tras la simulación, la cual puede ser vista en la pestaña Input e interpretada desde la pestaña Browse Data de la ventana que se muestra al abrir el archivo; su creación y detalles de contenido se muestran en las Figuras 66 y 67.

Figura 66.

Creación de archivo de análisis .anf a partir de archivos de datos escalares .sca o vectoriales .vec

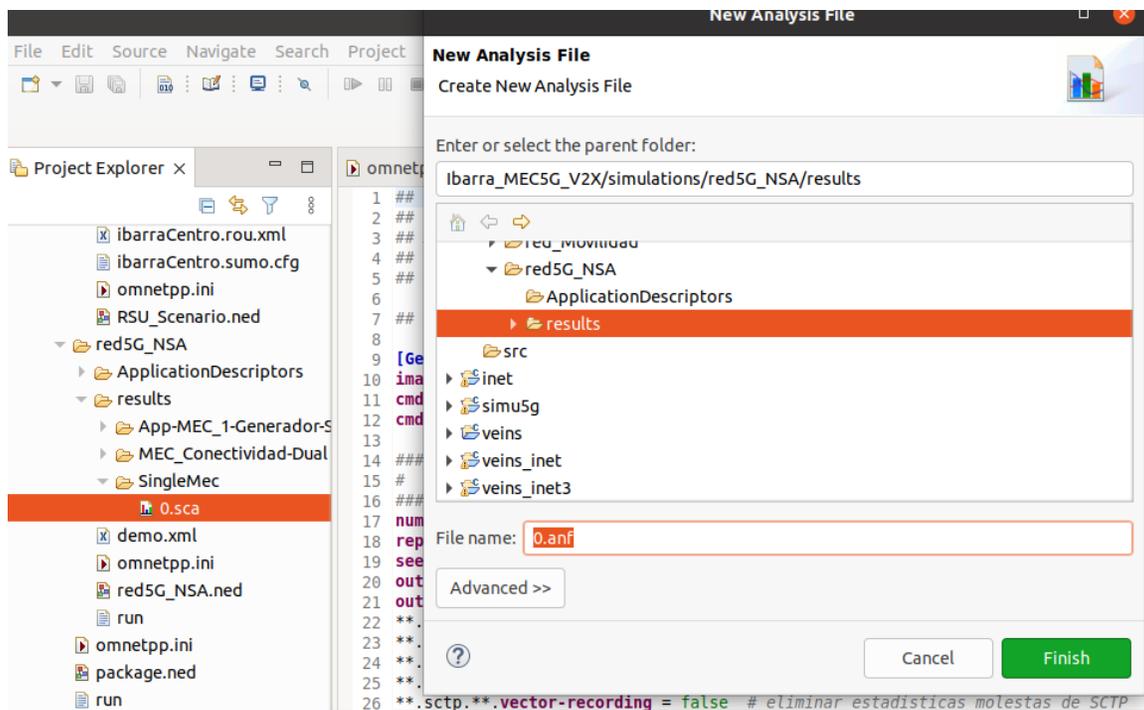
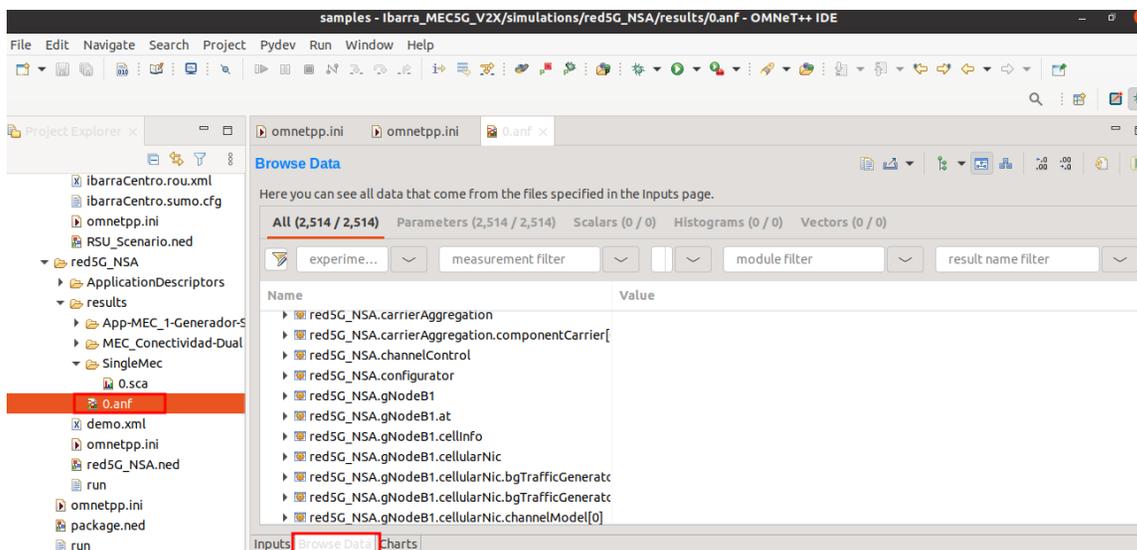


Figura 67.

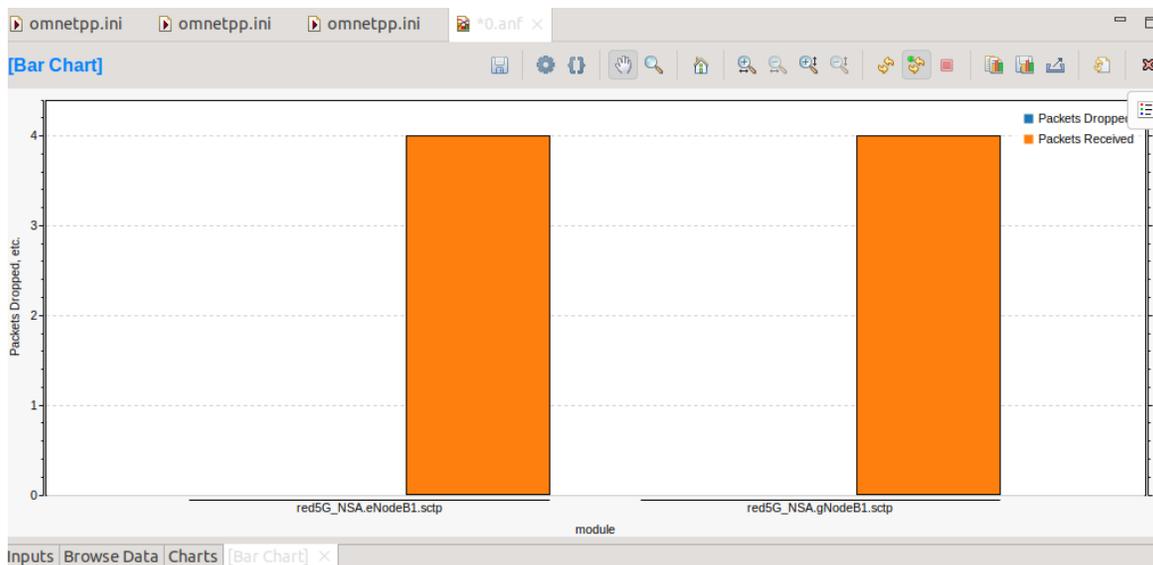
Contenido del archivo *.anf* pestaña *Browse Data*



En la pestaña *Browse Data* de la Figura. 67 es posible verificar uno o varios módulos y submódulos en función de resultados escalares o vectoriales y opcionalmente histogramas; cualquiera de estos puede ser evaluado de forma gráfica únicamente al seleccionarse el submódulo correspondiente o el conjunto de submódulos, como ejemplo de los pasos realizados se muestra la Figura 68, en donde se evalúa la configuración del submódulo *Packets* del escenario *red5G_NSA* extraído de la simulación ejecutada como se mostró en la Figura 65; se observa la eficiencia del sistema ya que se recibieron por completo en las estaciones base e/gNodeB los paquetes transmitidos por los UE en la última milla, no hay paquetes caídos o perdidos.

Figura 68.

Ejemplo de resultados obtenidos del submódulo Packets a partir del escenario red5g_NSA



4.2.2 Análisis de resultados

Como se mencionó en la sección **3.4. Diseño de sistema de comunicación**, se considera un área de 3.42 [Km²] para la zona de evaluación en del centro de la ciudad de Ibarra; dicha área está delimitada por calles adyacentes como se explica en la sección **3.4.1. Delimitación de la zona de cobertura**, esto permite analizar la información obtenida para los dos escenarios considerados, que son la red de movilidad vehicular, estructurada por las rutas de autobuses en conjunto con la red 5G NSA para una comunicación a larga distancia y de manera opcional una RSU para comunicación entre OBU's a corta distancia, esta última se implementa únicamente como plus y no es considerada en la etapa de diseño ya que el enfoque del proyecto es la operación directa con la red 5G.

Lo mencionado permite la captura de información periódica respecto al estado y geoposicionamiento vehicular a partir de paquetes de datos simulados con origen en cada unidad

vehicular; para así analizar el escenario de tratamiento de la información capturada, este se considera como la red de transporte, misma que está enfocada a un entorno 5G NSA con sus equipos respectivos, en donde su primera etapa considera la recepción de información en estaciones base de las tecnologías mencionadas, para una vez tratada, esta se difunda en un servidor local, simulando así la salida de datos decodificados hacia internet.

Para los escenarios IEEE 802.11p y 5G NSA planteados se realizó la configuración de los parámetros que se mencionan en la Tabla 11, mismos que se requiere establecer en los archivos de inicialización respectivos, dichos valores fueron definidos de acuerdo con especificaciones teóricas/técnicas correspondientes al 3GPP Release 15 enfocado al 5G no autónomo y trabajos de investigación relacionados.

Tabla 11.

Parametrización de condiciones de simulación para las redes IEEE 802.11p y 5G NSA

Parámetro	IEE 802.11p	5G NSA
Número de vehículos (autobuses)	12	6
Sensibilidad UE	-110 [dBm]	-110[dbm]
Bitrate	12 [Mbps]	12 [Mbps]
Frecuencia central	5900 [MHz]	3500 [MHz]
Modo de acceso	TDD	TDD
Ancho de banda	10 [MHz]	10 [MHz]
Potencia de estación base	25 [dBm]	40 [dBm] (eNodeB/gNodeB)
Potencia UE (autobuses)	23 [dBm]	23 [dBm]
Ganancia estación base	20 [dBi]	15 – 18 [dBi] - soporte MIMO

Ganancia UE (autobuses)	0 [dBi] - ideal	0 [dBi] - ideal
Tipo de antena	Monopolo	Omnidireccional

Los parámetros especificados tienen una gran relación con la operación esperada de la red de comunicación, principalmente las frecuencias centrales de operación para cada una de las tecnologías que se va a evaluar, mismas que han sido establecidas de acuerdo a estándares inalámbricos como se mencionó en el capítulo 2, siendo 3.5 [GHz] a razón de su próxima adjudicación en Ecuador para el entorno de redes móviles de quinta generación 5G y 5.9 [GHz] para operación de redes vehiculares bajo el estándar IEEE 802.11p, cada una con un ancho de banda de 10 [MHz].

La potencia de la transmisión de las unidades vehiculares es de 23[dBm] de acuerdo con la recomendación UIT-R M.2084-1 para redes móviles urbanas con base a micro celdas, mientras que la sensibilidad es de -110 [dBm] lo que permite discriminar paquetes con alto BER (Tasa de error de bit); los paquetes transmitidos por cada UE hacia el RSU tienen un bitrate de 12 [Mbps], con el fin de representar aplicaciones de difusión de datos de tráfico; este valor fue tomado de la investigación teórica realizada en el capítulo 2, y en conjunto con los parámetros anteriores se mantienen para la configuración de Beacon o Balizamiento⁵⁵ considerando la escalabilidad del sistema para soporte de alto nivel de tráfico de datos en horas pico.

Por parte de la etapa de tratamiento de la información se considera un valor de 1 - 10 [W], específicamente 10 [W] que es equivalente a 40 [dBm] para soporte de servicio para 100 a 2000 usuarios en ambientes indoor/outdoor, dicho valor es establecido en las estaciones base eNodeB y

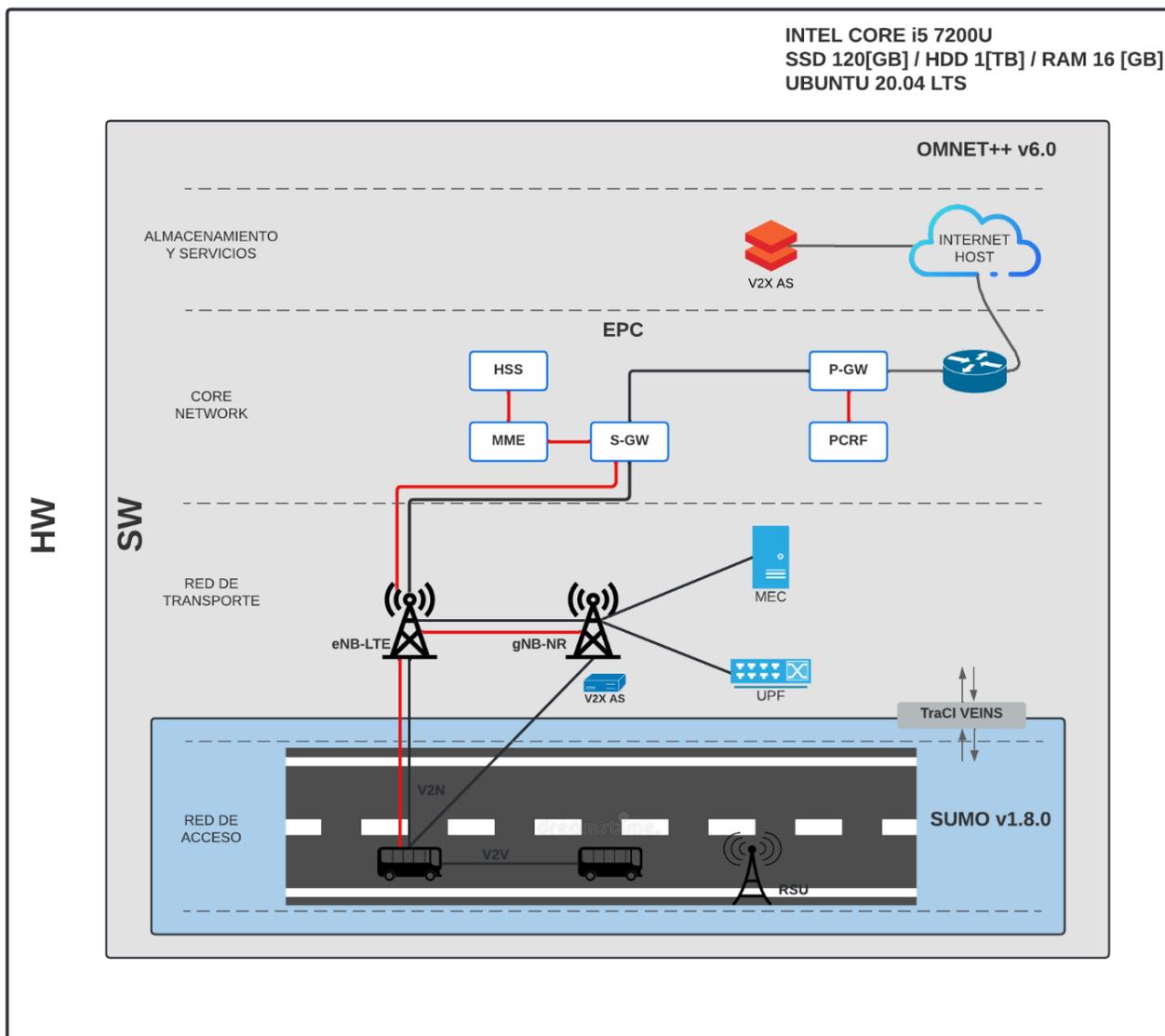
⁵⁵ Beacon: Intervalo de frecuencia representado como paquete emitido por el enrutador con el fin de sincronizar la red inalámbrica.

gNodeB correspondientes a las redes móviles 4G y 5G que en conjunto estructuran un ambiente 5G NSA encargada del procesamiento de un paquete simulado de 193 [Bytes] considerado bajo criterios expuestos por (5GAA, 2019), en su sección responsabilidad, donde especifica que dicho valor se establece en base a pruebas bajo condiciones ideales de transmisión de radiofrecuencia, es decir, la propagación de ondas radioeléctricas se da en línea de vista sin interferencia y con alto nivel de señal . Todo el proceso expuesto es un punto de partida de generación de información a ser tratada en las etapas MEC y Core, las cuales mantienen parámetros por defecto, estos son tomados de las bases bibliográficas investigadas para este proyecto y ejemplos de comunicación disponibles en los paquetes del simulador Omnet++ con el fin de no saturar esta sección con información estándar.

Una vez parametrizadas las redes de comunicación se evalúan en un ambiente de simulación bajo las especificaciones de hardware y software mostradas en la Figura 69.

Figura 69.

Diagrama de operación de la red de comunicación de acuerdo con el hardware y software empleado para pruebas



4.2.2.1 Análisis de escenario red_Movilidad

La red de movilidad vehicular simulada se encuentra en el repositorio "red_Movilidad" y corresponde a la simulación antes creada con el software SUMO, a esta se le complementan los componentes disponibles en Omnet++ que parametrizan nodos y enlaces, entre ellos targetBler,

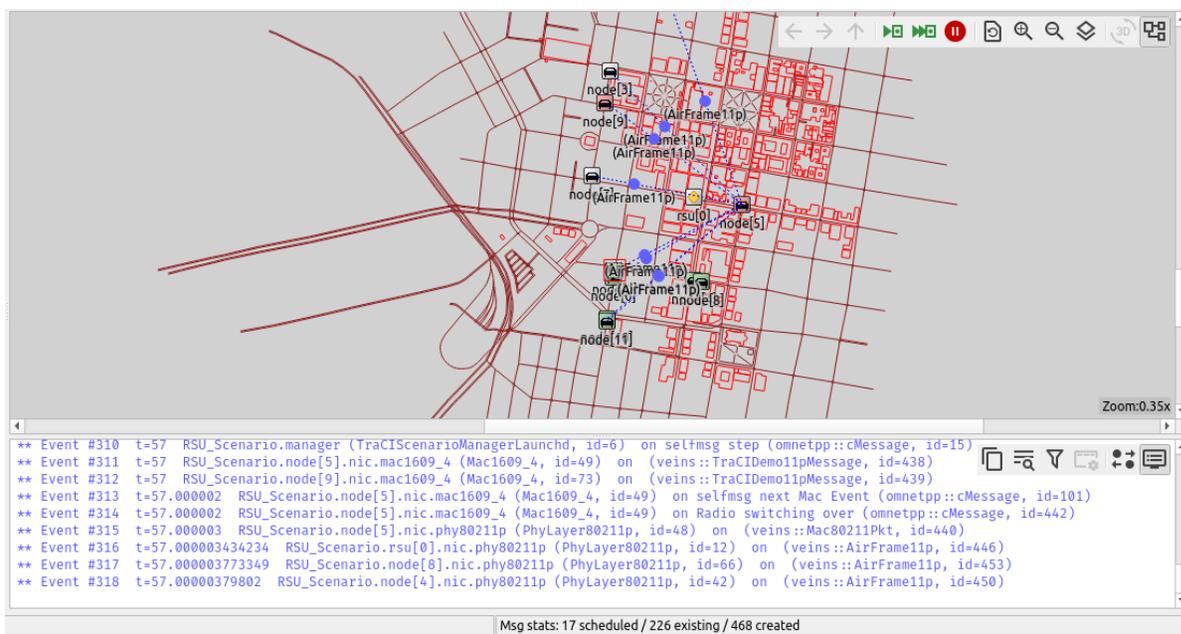
radioMode, configuration, entre otros; estos permiten evaluar el rendimiento de la capacidad de difusión a través de métricas QoS definidas por el Release 16 del 3GPP para aplicaciones V2X..

Para ejecutar la prueba de comunicación en la red de movilidad vehicular es necesario tener habilitada la librería TraCI en el equipo anfitrión, para que, una vez ejecutada la simulación, se generen eventos que inicialmente se encarguen de establecer la frecuencia de la portadora en 5.9 [GHz] de acuerdo al estándar IEEE802.11p en función de los módulos de capa física y subcapa MAC.

Por parte de los módulos de capa de red se muestran conexiones punto a punto, dado que es una prueba en entorno VANET y no es centralizado, por lo tanto, no se requieren identificadores lógicos de equipos en red, tales como direcciones IP; durante todo este proceso el módulo TraCI permite gestionar los canales de comunicación para el control de tráfico en base a la información de nodos y rutas programadas en el mapa de movilidad. Como se observa en la Figura 70, el envío y recepción de paquetes entre UEs y RSU se ejecutan en periodos de tiempo y logran generar datos para las capas superiores.

Figura 70.

Eventos generados en comunicación V2X bajo el estándar IEEE 802.11p



Para las pruebas correspondientes a este entorno de simulación se hace uso del analizador de datos incluidos en Omnet++, el cual bajo lo especificado en el script de inicialización recoge los datos de ejecución y genera archivos de análisis de tipo escalar, vectorial, histograma y de forma gráfica un diagrama de secuencia; todo ello tomando como referencia de análisis la variación en el valor de beacon, de esta forma se verifica la eficiencia del sistema en condiciones de demanda variable.

❖ Escenario de movilidad vehicular sin paquetes beacon

En este caso se realiza la prueba de interacción de nodos vehiculares y RSU en el entorno simulado correspondiente a la urbe central de la ciudad de Ibarra; los parámetros considerados como variables para esta prueba son la inhabilitación del intervalo beacon, para ello se establece su valor en false para cada elemento de red tal como se muestra remarcado en color rojo en la Figura 71, de esta forma se omite el uso de recursos por parte de los equipos para transmisión de paquetes que permitan la sincronización de la red inalámbrica.

Figura 71.

Modificaciones de código para pruebas de rendimiento de red vehicular sin paquetes beacon

```
#####
#                               CONFIGURACIONES RSU
#
#
#####
*.rsu[0].mobility.x = 4650
*.rsu[0].mobility.y = 5000
*.rsu[0].mobility.z = 3

*.rsu[*].applType = "TraCIDemoRSU11p"
*.rsu[*].appl.headerLength = 80 bit
*.rsu[*].appl.sendBeacons = false
*.rsu[*].appl.dataOnSch = false
*.rsu[*].appl.beaconInterval = 1s
*.rsu[*].appl.beaconUserPriority = 7
*.rsu[*].appl.dataUserPriority = 5
*.rsu[*].nic.phy80211p.antennaOffsetZ = 0 m

#####
#                               CAPA APLICACION
#####
*.node[*].applType = "TraCIDemo11p"
*.node[*].appl.headerLength = 80 bit
*.node[*].appl.sendBeacons = false
*.node[*].appl.dataOnSch = false
*.node[*].appl.beaconInterval = 1s
```

Tras haber modificado el código fuente en el script de inicialización se procede a ejecutar el mismo mediante la opción **Run**, posteriormente se selecciona la opción **Defecto** en el cuadro de opciones desplegadas que aparece; una vez realizado esto la simulación se ejecuta bajo los valores definidos en un tiempo de 200 [s], luego de haberse ejecutado la simulación se generan los archivos de resultados **.vec**, **.sca**, **.vci**, **.elog** y por consiguiente el archivo **.anf** generado a partir de cualquiera de ellos; dichos términos se explicaron en la sección 4.2.1 y se muestran a continuación en las Figuras 72 y 73 para el caso planteado.

Figura 72.

Archivos de resultado generados para escenario de movilidad vehicular sin paquetes beacon

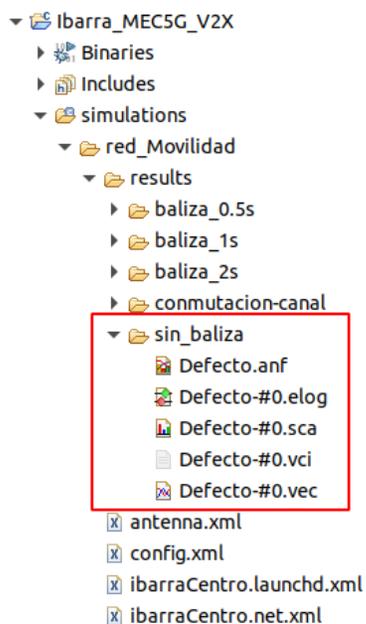
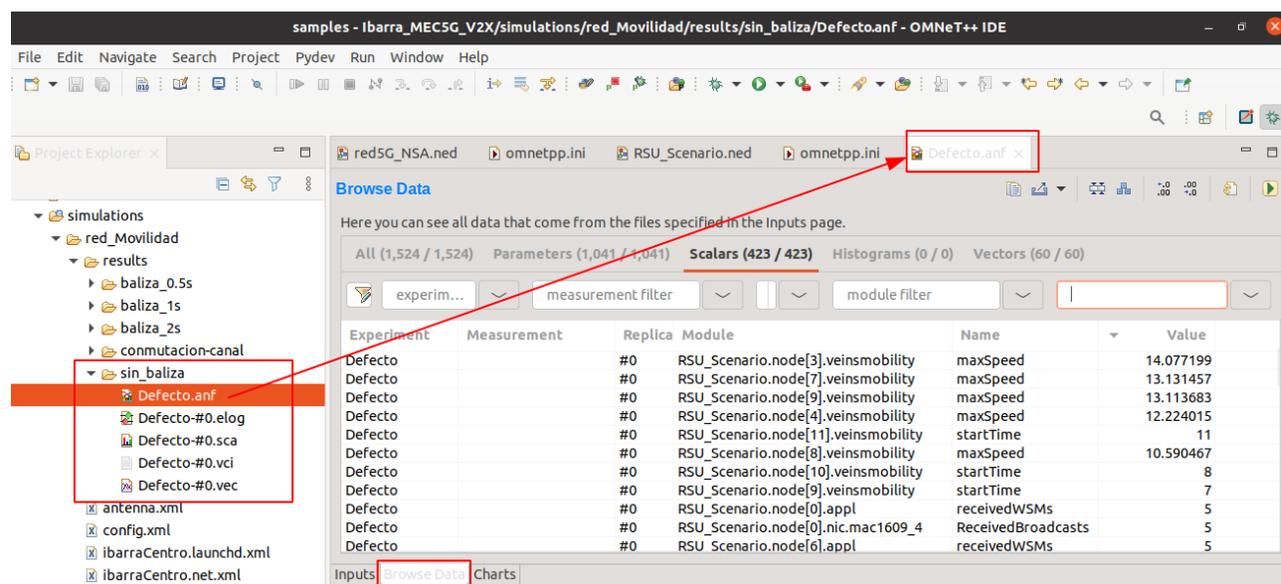


Figura 73.

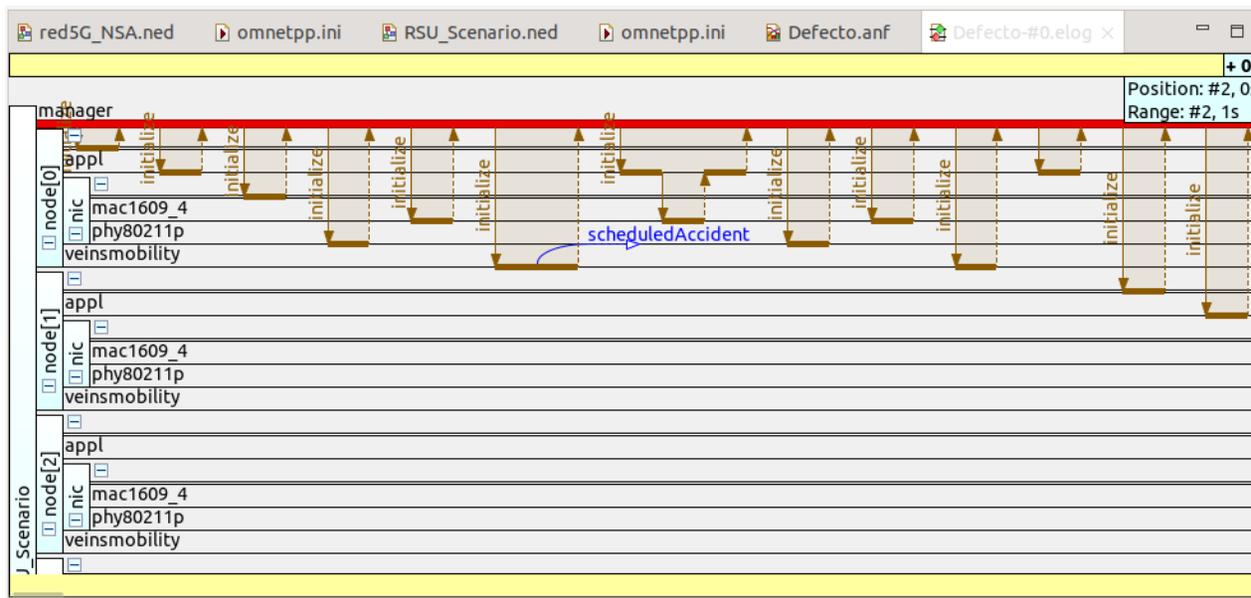
Archivos .anf resultantes para escenario de movilidad vehicular sin paquetes beacon



Al evaluar los resultados obtenidos se evidencia a partir del archivo *.elog* que la interacción nodos – RSU es sincronizada y parte de la inicialización de portadoras y cada PDU en las capas operativas de los vehículos como se observa en el reporte de la Figura 74; en donde la comunicación parte de la encapsulación de datos por la capa *appl*, que implementa las aplicaciones y servicios que se ejecutan en el vehículo y la RSU; luego la información pasa a la NIC por la capa *MAC* para controlar el acceso al medio y garantizar la correcta transmisión de los paquetes de datos, para finalmente con la intervención de la capa *veinsmobility* que proporciona la información de movimiento y posición del vehículo UE en el entorno de simulación; todo el proceso descrito tiene una duración establecida de 1[s] para cada unidad vehicular, se lleva a cabo priorizando la UE que este más cerca del RSU y permite que una vez inicializada la comunicación se genere el intercambio de datos entre nodos, para lo cual en cada fase se asigna un nodo maestro.

Figura 74.

Inicialización de comunicación inalámbrica en red vehicular

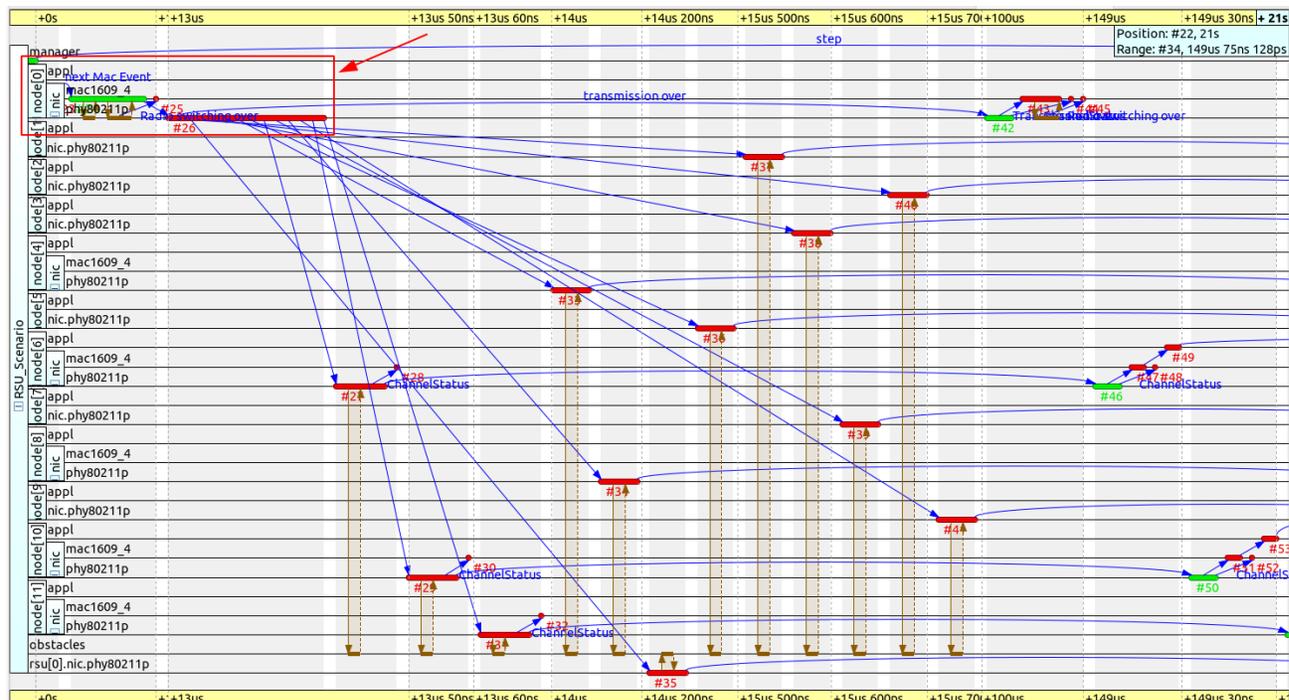


Para la designación del nodo maestro en el entorno de simulación interviene las capas *nic_phy80211p* y *appl*; la capa *nic_phy80211p* se encarga de la transmisión y recepción de paquetes de datos a través del espectro inalámbrico; además, recolecta información sobre la calidad del canal y la proporciona a la capa *appl* para su evaluación y de esta forma determinar cuál de los nodos es el más adecuado para ser el nodo maestro, es decir el nodo que presente las menores interferencias en la comunicación de extremo a extremo; una vez seleccionado el nodo maestro, la capa *appl* coordina la comunicación entre el UE y la RSU a través de la capa *nic_phy80211p*, garantizando una transmisión efectiva de los paquetes de datos simulados con bitrate de 12[Mbps]; el proceso de transmisión de datos entre UE – RSU en el área geográfica definida se lleva a cabo durante un tiempo estimado de 0.1 [ms] con variaciones +/- 55[us] hasta que un nuevo nodo maestro sea designado, esto depende de las condiciones físicas del entorno, ya que son las limitantes de la capacidad de transmisión de los nodos en la red.

Como ejemplo de lo antes mencionado se muestra la Figura 75, en donde se identifica un instante de transmisión dentro del diagrama de secuencia generado por el simulador, este evento permite posteriormente dar paso al intercambio de datos de estado vehicular o designados por dispositivos instalados

Figura 75.

Transmisión de datos en red vehicular V2I - identificación de nodo maestro



A través del archivo *.anf* generado se puede observar las estadísticas para cada variable parametrizada en la red de comunicación, de forma fundamental se considera la tasa de envío y recepción de paquetes, misma que más adelante será evaluada de forma comparativa para las condiciones consideradas en el entorno; para este caso sin paquetes beacon, en las Figuras 76 y 77 se muestran la tasa de paquetes enviados y perdidos en la comunicación.

Figura 76.

Paquetes totales enviados (11) para escenario de movilidad vehicular sin paquetes beacon

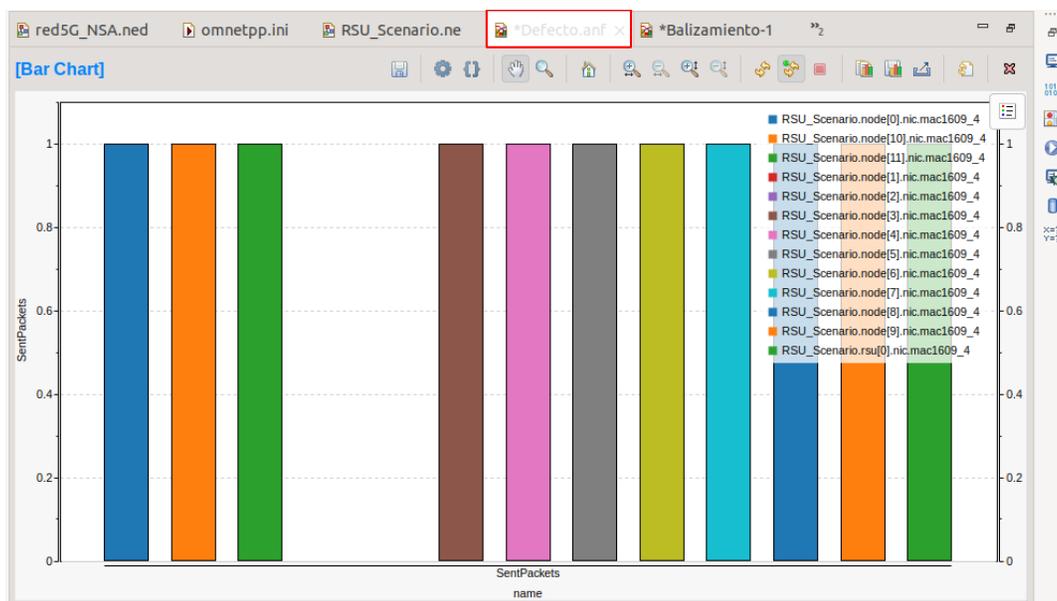
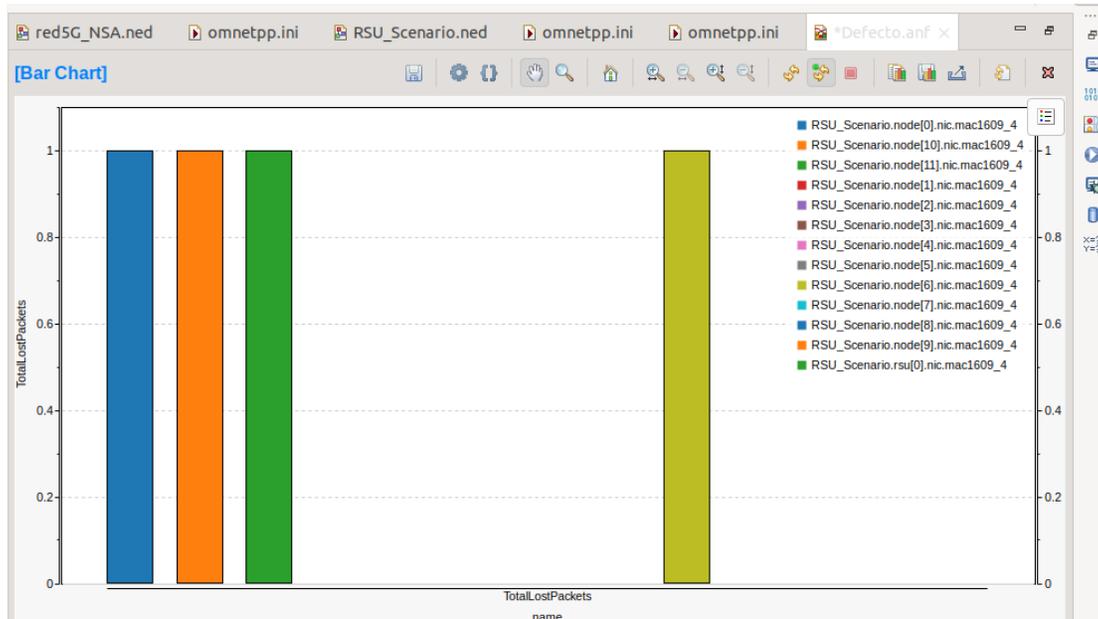


Figura 77.

Paquetes totales perdidos (4) para escenario de movilidad vehicular sin paquetes beacon



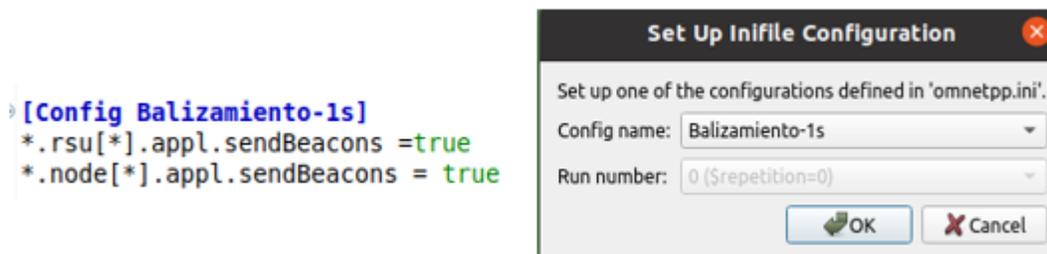
En la siguiente prueba se evalúa el rendimiento de la red bajo la variación del tiempo de transmisión de paquetes de sincronización Beacon entre cada Unidad de Usuario (UE) y la Estación de Servicio de la Red (RSU) en una red V2X (Vehicle-to-Everything). Este tiempo se establece como tiempo total y al relacionarse entre el número de paquetes transmitidos permite obtener una equivalencia en Hertz (Hz) denominada frecuencia. Por ejemplo, si se transmite un paquete cada 2 segundos, entonces la frecuencia será de 1 paquete por 2 segundos, es decir, $1/2$, que equivale a 0,5 [Hz]. Este estudio permitirá evaluar la eficiencia de la transmisión de paquetes de sincronización y la capacidad de la red para adaptarse a diferentes condiciones de tráfico y demanda de la red; con el fin de ejemplificar el proceso, únicamente se detalla la obtención de resultados para 1[Hz], mientras que para 0.5[Hz], 0.25[Hz] y 0.75[Hz] se presentan directamente en la Tabla 12 los resultados obtenidos tras la simulación.

❖ **Escenario de movilidad vehicular con paquetes beacon bajo frecuencia de 1[Hz]**

Al igual que el caso anterior, el primer paso es realizar la modificación de la estructura de código de inicialización, colocando el valor de 1[s] en las líneas que determinan *beaconInterval* y habilitando la función respectiva para los nodos y para la RSU; la ejecución de la simulación se realiza desde la opción Balizamiento desde el desplegable como se muestra en la Figura 78.

Figura 78.

Selección de tipo de simulación Balizamiento con frecuencia de 1[Hz] para entorno de movilidad vehicular



Luego de haber sido ejecutada la simulación se generan los archivos de resultado, los cuales permiten el análisis de etapas de comunicación y flujo de paquetes; la evidencia de dichos archivos se muestra en la Figura 79 y el contenido del archivo analizable *.anf* en la Figura 80.

Figura 79.

Archivos de resultado generados para escenario de movilidad vehicular con paquetes beacon a 1[Hz]

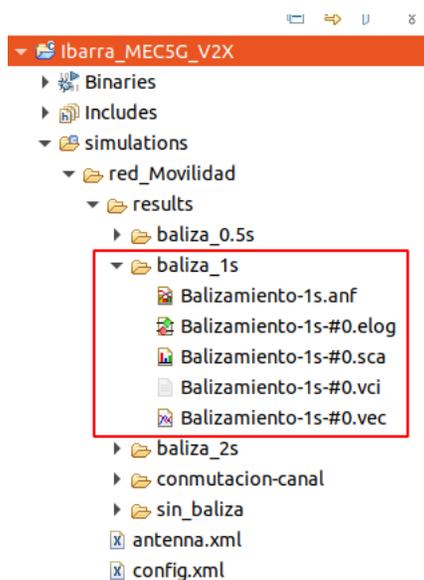


Figura 80.

Archivos *.anf* resultantes para escenario de movilidad vehicular con paquetes beacon a 1[Hz]

The screenshot shows the OMNeT++ IDE interface. The 'Project Explorer' on the left displays the project structure, with the file 'Balizamiento-1s.anf' highlighted in red. The 'Browse Data' window in the center shows a table of scalar measurements for the 'Balizamiento-1s' experiment. A red arrow points from the highlighted file in the project explorer to the 'Balizamiento-1s' row in the table.

Experiment	Measurement	Replica	Module	Name	Value
Balizamiento-1s		#0	RSU_Scenario.node[9].veinsmobility	stopTime	14.480056
Balizamiento-1s		#0	RSU_Scenario.node[10].veinsmobility	stopTime	14.480056
Balizamiento-1s		#0	RSU_Scenario.node[11].veinsmobility	stopTime	14.480056
Balizamiento-1s		#0	RSU_Scenario.node[1].veinsmobility	maxSpeed	14.240072
Balizamiento-1s		#0	RSU_Scenario.node[2].veinsmobility	maxSpeed	14.086856
Balizamiento-1s		#0	RSU_Scenario.node[0].appl	generatedBSMs	14
Balizamiento-1s		#0	RSU_Scenario.node[0].nic.mac1609_4	SentPackets	14
Balizamiento-1s		#0	RSU_Scenario.node[0].nic.mac1609_4	TimesIntoBackoff	14
Balizamiento-1s		#0	RSU_Scenario.node[0].nic.mac1609_4	sentPackets:count	14
Balizamiento-1s		#0	RSU_Scenario.node[1].appl	generatedBSMs	14
Balizamiento-1s		#0	RSU_Scenario.node[1].nic.mac1609_4	SentPackets	14

El análisis de los archivos de valor generados para cada variable permite apreciar el flujo de información a través de la red, como se muestra en la Figura 81, este depende directamente de la frecuencia de los paquetes beacon, ya que, de esta forma, mediante la sincronización periódica cada 1 [s] entre terminales se reduce la pérdida de datos en el medio inalámbrico como se puede apreciar en los resultantes del archivo *.anf* de las Figuras 82 y 83, en donde, al igual que en el caso anterior, se considera la tasa de paquetes enviados y perdidos entre nodos y RSU.

Figura 81.

Transmisión de datos en red vehicular V2I - identificación de paquete beacon a 1[Hz]

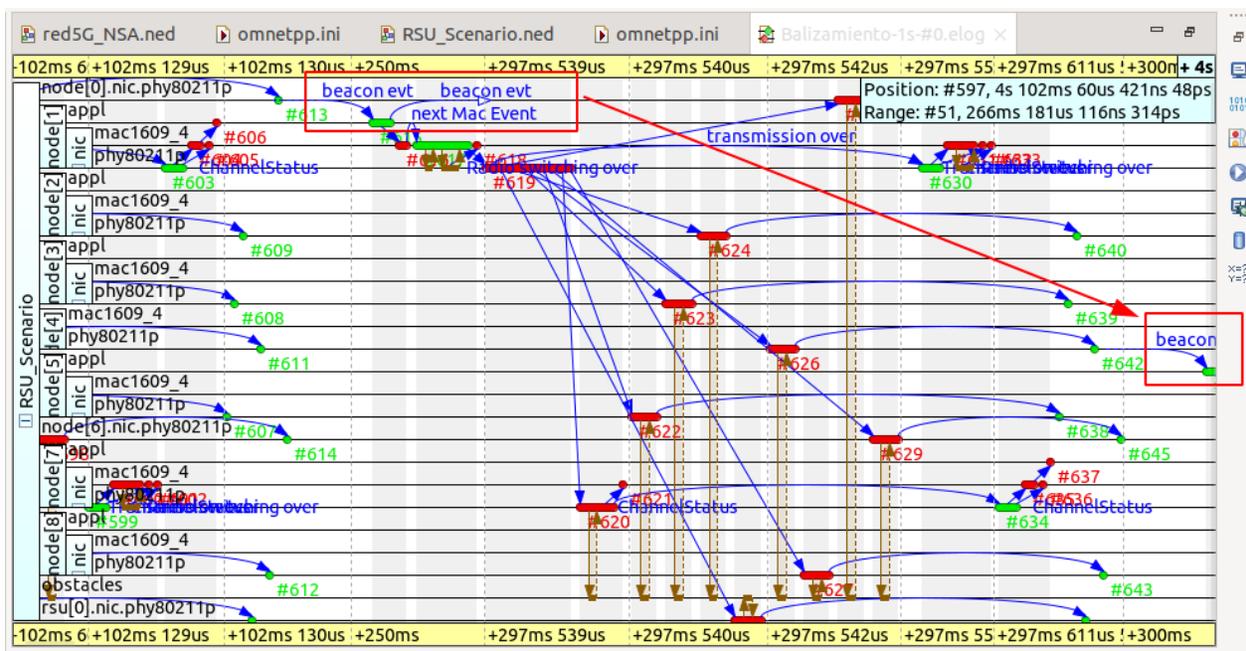


Figura 82.

Paquetes totales enviados (1626) para escenario de movilidad vehicular con paquetes beacon a 1[Hz]

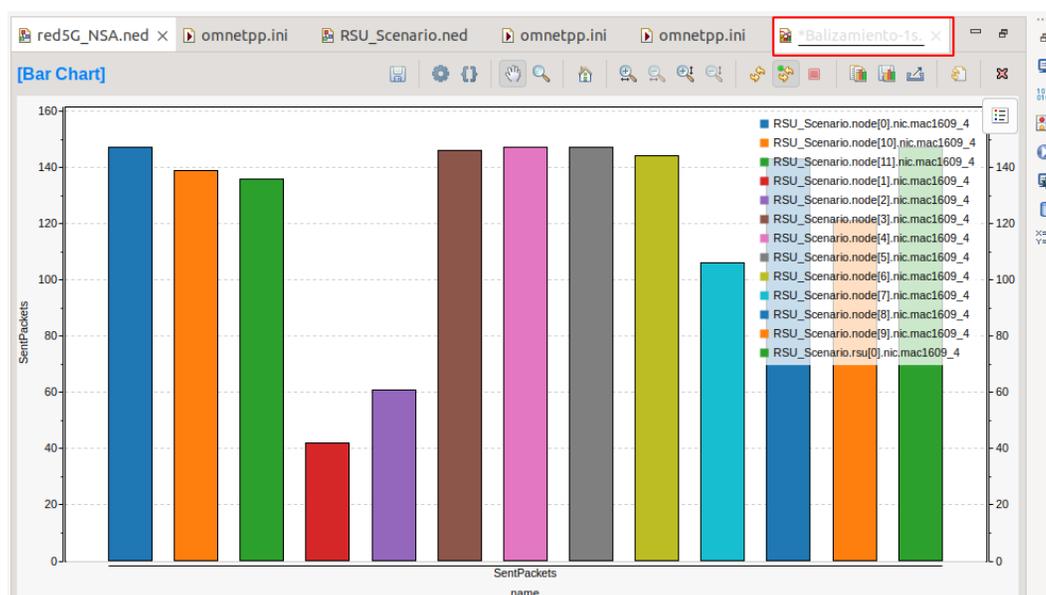
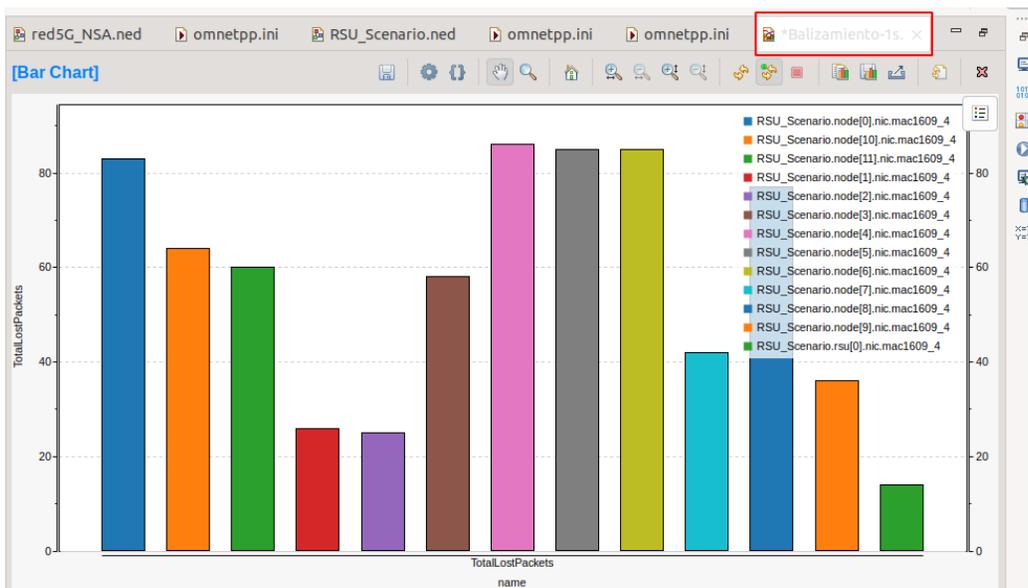


Figura 83.

Paquetes totales perdidos (741) para escenario de movilidad vehicular con paquetes beacon a 1[Hz]



En base a los archivos *.anf* generados para cada caso de simulación se procede con la evaluación de desempeño del protocolo 802.11p en la red, para ello se evalúa de forma concreta el Throughput en base a los criterios establecidos por el RFC 2544 (IETF, 2022), en donde se declara datos principales del rendimiento de una red, los valores de perdida de paquetes, mismos que extraen del escenario al concluir el tiempo de simulación; la ecuación para este caso se expresa en la Ecuación 1. y puede ser calculada como paquetes de datos por segundo [pps] o bits por segundo [bps] (Viscaino Gavilanes, 2018); en base a evidencia mostrada anteriormente, los resultados se dan a conocer en la Tabla 12.

Ecuación 1.*Cálculo de Throughput*

$$\text{Throughput} = \frac{N}{1000}$$

Nota. N es el número de bits o paquetes satisfactoriamente recibidos por todos los nodos destino

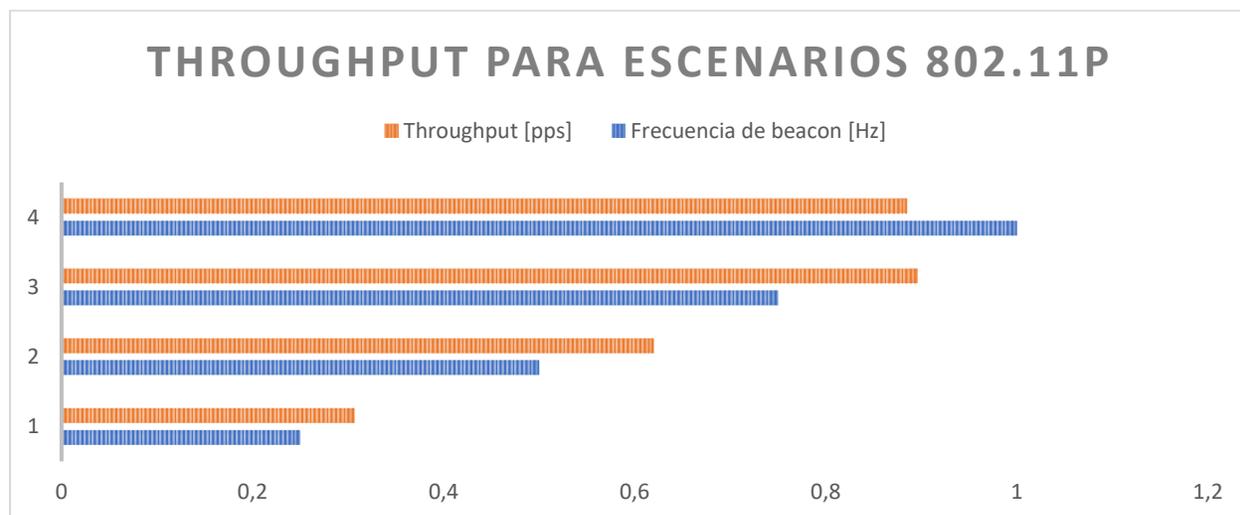
Tabla 12.*Recopilación de pruebas de simulación para escenarios 802.11p con variación de beacon*

Nro. de Prueba	Frecuencia de beacon [Hz]	Total de paquetes enviados	Total, de paquetes perdidos	Porcentaje de pérdida de paquetes [%]	Throughput [pps]
1	0	11	4	36.36	0.007
2	0.25	514	207	40.27	0.307
3	0.5	1018	398	39.10	0.62
4	0.75	1525	609	39.93	0.896
5	1	1626	741	45.57	0.885

Tras haber realizado el cálculo correspondiente de Throughput para los escenarios planteados se tiene como resultante la gráfica mostrada en la Figura 84, misma que permite extraer como criterio que la frecuencia de transmisión de paquetes de baliza en la red sincroniza de forma óptima la comunicación ya que reduce el índice de pérdida de paquetes, lo que para escenarios de movilidad vehicular es altamente útil; para baja demanda de comunicación la pérdida es menor como se muestra para el caso de transmisión sin paquetes de baliza, esto no es óptimo ya que la capacidad de transmisión también es menor y al no tener un flag que sincronice la comunicación no es posible definir una transmisión efectiva en tiempo real o con la mínima latencia.

Figura 84.

Throughput en [pps] de la red de movilidad vehicular bajo protocolo IEEE 802.11p



Nota. El eje vertical del gráfico hace referencia al Nro. de prueba ejecutada, mismo que consideran un orden ascendente en la frecuencia del beacon para poder evaluar la calidad de la transmisión en función de la relación de paquetes transmitidos por segundo [pps]

4.2.2.2 Análisis del escenario red5G_NSA

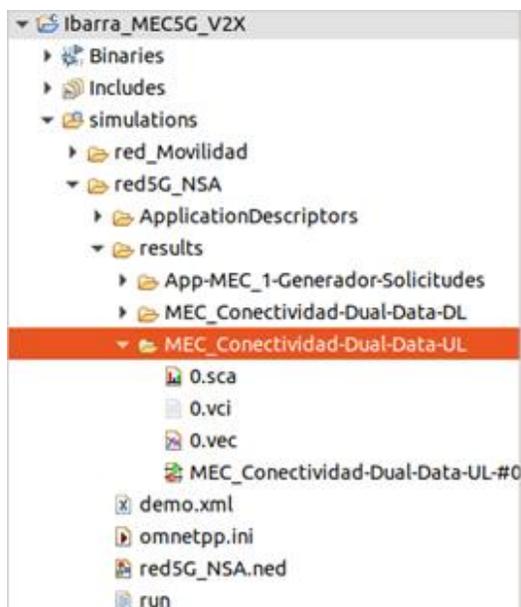
El presente escenario es el encargado de gestionar los paquetes de información durante su tránsito desde un punto de origen conocido como UEs hasta un punto de destino denominado v2xServer debido al servicio que se está simulando; en este diseño se considera estrictamente la integración de las tecnologías propuestas en el proyecto con el fin de obtener resultados que permitan establecer criterios de rendimiento para la red.

Tras verificar la correcta operación del escenario de simulación en la sección **4.2.1** de este documento, se procede a evaluar el mismo bajo condiciones de Uplink/Downlink, las cuales están parametrizadas de acuerdo con la información expuesta en la Tabla 11 mostrada inicialmente en la sección **4.2.2**. Una vez ejecutada la simulación, al igual que en el caso de la red de movilidad,

se obtienen archivos de resultados *.anf* y *.elog*, que sirven como base para la extracción de índices de valor que permiten probar el rendimiento de la red. Los criterios escogidos para este se basan en el RFC 2544 (IETF, 2022) y (Tanenbaum & Wetherall, 2012), considerando la tasa de pérdida de paquetes, throughput, latencia y jitter como esenciales, estos son determinados en base a los archivos de resultados generados que se muestran en la Figura 85.

Figura 85.

Archivos de resultado generados para escenario MEC 5G NSA bajo condiciones de movilidad vehicular



Los resultados de transmisión de datos se evalúan en función al escenario de Uplink, el cual está condicionado con datos específicos de tamaño de paquete para optimizar el uso de recursos del equipo anfitrión; de esta forma, se obtienen valores concretos en base a escenarios con una duración de 30 [s] de simulación, por parte del escenario Downlink únicamente se tiene resultados de procesos más no valores de tamaños de paquete. A continuación, en las Figuras 86 y 87 se muestra el contenido del archivo *.anf* correspondiente.

Figura 86.

Archivos *.anf* resultantes para escenario MEC 5G NSA Uplink

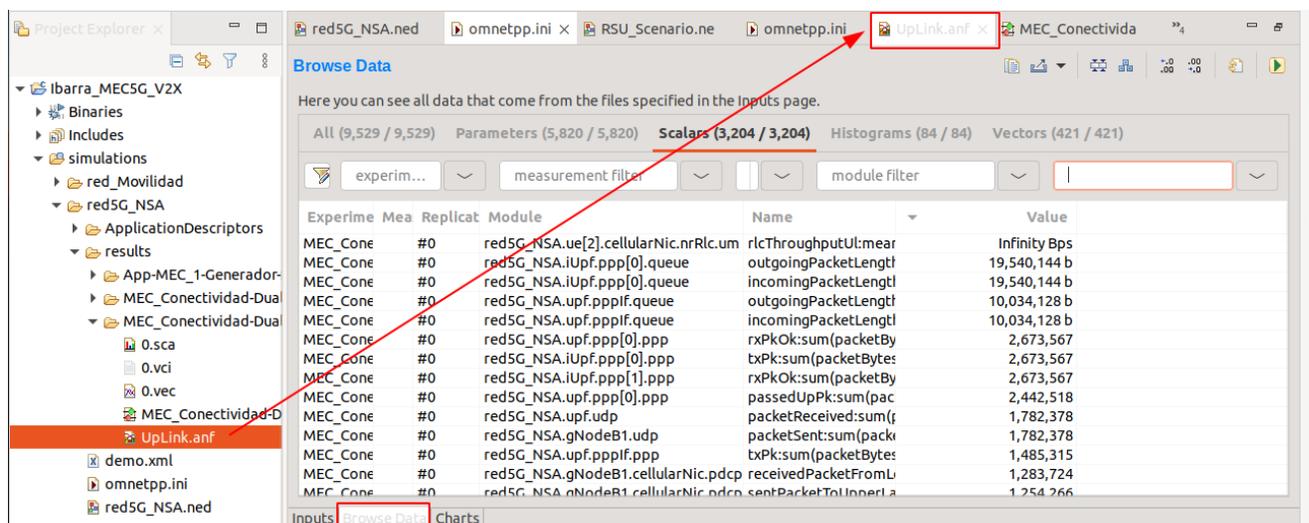
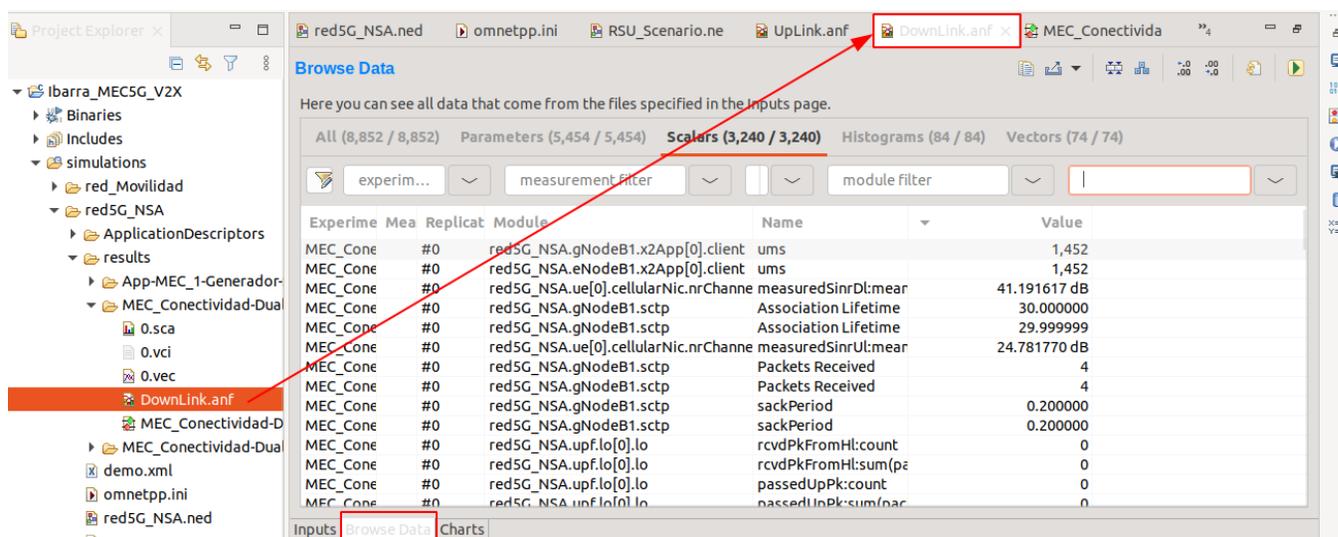


Figura 87.

Archivos *.anf* resultantes para escenario MEC 5G NSA Downlink



Como se puede observar, existe una gran cantidad de resultados escalares, vectoriales e histogramas. Por ello, para la evaluación de las métricas de valor, se opta por el uso de filtros con el fin de conocer el rendimiento de cada elemento de red durante el proceso de transmisión de

identifica el actuar del protocolo de red GTP, mismo que es utilizado para permitir la transmisión de paquetes de datos a través de redes celulares utilizando la tecnología GPRS, de forma que proporciona un marco para el transporte de paquetes de datos a través de una red de comunicación y permite la conectividad entre el usuario final y la red PDN; la estructura de su trama está conformada por un encabezado fijo de 8 bytes y una sección de datos variables. El encabezado fijo incluye información importante como el tipo de mensaje, la longitud total de la trama, identificadores de sesión y tunnel, información de checksum, entre otros; mientras que la sección de datos variables puede incluir información adicional, como direcciones IP de origen y destino, información de control de flujo, etc; esta estructura en conjunto denota que la estructura de la trama GTP es flexible.

Figura 89.

Identificación del protocolo GTP en el diagrama delay del escenario Uplink 5G NSA



Una vez verificada la operación de la red de comunicación y el acceso a los archivos de resultados, a continuación, se muestra el análisis de cada una de las métricas de rendimiento planteadas en conjunto con la evaluación de la calidad del canal inalámbrico de comunicación de acuerdo con valores CQI para la red MEC 5G NSA Uplink.

❖ Throughput

Estos datos son definidos a partir de los valores de paquetes transmitido en la red, mismos que son extraídos directamente del archivo *.anf* generado y se muestran en la Tabla 13, detallando la cantidad de paquetes de datos enviados por cada UE y los paquetes recibidos por la estación base gNodeB y Upf durante el rango de comunicación delimitado en la simulación, que corresponde a 30 [s].

Tabla 13.

Paquetes de datos transmitidos por UEs

Parámetro	Identificador de unidades vehiculares	Paquetes enviados	Paquetes recibidos por gNodeB	Paquetes recibidos por UPF
Archivo	<i>packetSent:count ue[-].udp</i>		<i>packetSent:count gNodeB1.udp</i>	<i>packetSent:count upf.udp</i>
Detalles	ue[0]	5500	33001	33001
	ue[1]	5500		
	ue[2]	5500		
	ue[3]	5500		
	ue[4]	5500		
	ue[5]	5501		

Dicha información es una referencia para el análisis del Throughput en el entorno inalámbrico 4G y 5G NSA, el cual se define en el ambiente de simulación como RLC (Radio Link Control); a diferencia del caso anterior denominado red de movilidad vehicular, esta métrica es obtenida directamente de los resultados generados, omitiendo así el cálculo de la misma; únicamente se procede con la generación de una gráfica comparativa de acuerdo a los datos promedio o media de tipo vectorial mostrados en la Figura 90 a partir del archivo de origen rlcThroughputU:vector; como se observa en la descripción de la Tabla 14 dichos datos se presentan como nrRlc para la tecnología 5G y Rlc para la tecnología 4G.

Figura 90.

Valores RLC Throughput extraídos para la red MEC 5G NSA Uplink

Experiment	Mea Replica	Module	Name	Count	Mean	StdDev	Variance
MEC_Conectividada	#0	red5G_NSA.ue[0].cellularNic.rlc.um	rlcThroughputU:vector	2745	Infinity Bps	-	-
MEC_Conectividada	#0	red5G_NSA.ue[1].cellularNic.rlc.um	rlcThroughputU:vector	2755	Infinity Bps	-	-
MEC_Conectividada	#0	red5G_NSA.ue[2].cellularNic.nrRlc.um	rlcThroughputU:vector	2748	Infinity Bps	-	-
MEC_Conectividada	#0	red5G_NSA.ue[4].cellularNic.nrRlc.um	rlcThroughputU:vector	2751	49,866.596805 Bps	795,440.845980 Bps	632,726,139,453.404300 Bps²
MEC_Conectividada	#0	red5G_NSA.ue[4].cellularNic.rlc.um	rlcThroughputU:vector	2730	35,480.537248 Bps	396,015.487474 Bps	156,828,266,319.375400 Bps²
MEC_Conectividada	#0	red5G_NSA.ue[1].cellularNic.nrRlc.um	rlcThroughputU:vector	2750	34,171.515473 Bps	258,466.373486 Bps	66,804,866,223.116000 Bps²
MEC_Conectividada	#0	red5G_NSA.ue[5].cellularNic.nrRlc.um	rlcThroughputU:vector	2750	34,019.489696 Bps	230,494.836082 Bps	53,127,869,460.588036 Bps²
MEC_Conectividada	#0	red5G_NSA.ue[5].cellularNic.rlc.um	rlcThroughputU:vector	2716	33,383.775664 Bps	211,030.817167 Bps	44,534,005,793.995224 Bps²
MEC_Conectividada	#0	red5G_NSA.ue[3].cellularNic.rlc.um	rlcThroughputU:vector	2750	32,885.620835 Bps	205,089.674225 Bps	42,061,774,473.687930 Bps²
MEC_Conectividada	#0	red5G_NSA.ue[3].cellularNic.nrRlc.um	rlcThroughputU:vector	2750	32,816.628489 Bps	203,939.873709 Bps	41,591,472,088.432730 Bps²
MEC_Conectividada	#0	red5G_NSA.ue[0].cellularNic.nrRlc.um	rlcThroughputU:vector	2750	32,781.198881 Bps	209,455.084783 Bps	43,871,432,541.391304 Bps²
MEC_Conectividada	#0	red5G_NSA.ue[2].cellularNic.rlc.um	rlcThroughputU:vector	2721	31,136.311593 Bps	167,996.131664 Bps	28,222,700,253.998657 Bps²

Tabla 14.

Comparativa de valores de Throughput para tecnologías de radio 4G y 5G NSA

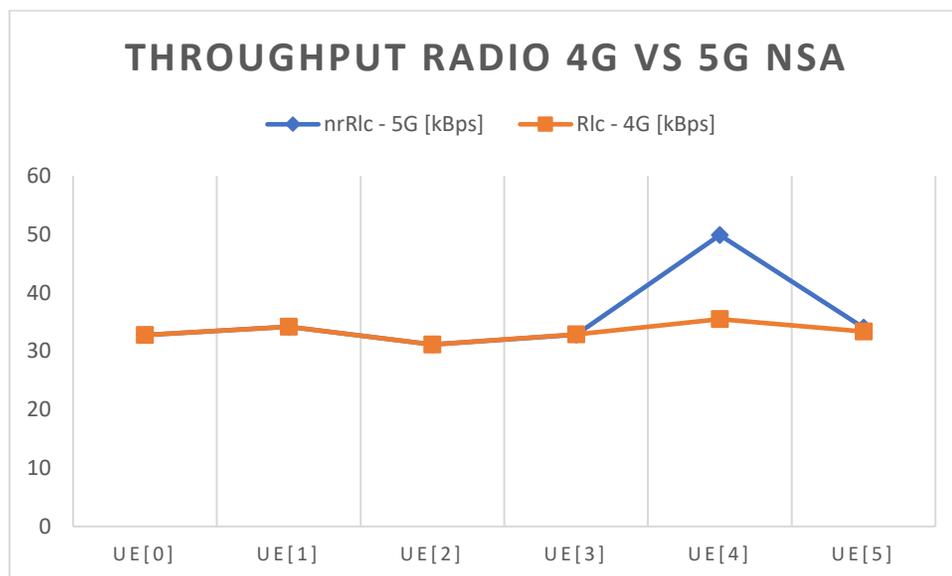
Unidad vehicular	nrRlc - 5G [kBps]	Rlc - 4G [kBps]
ue[0]	32.78	32.79
ue[1]	34.17	34.17
ue[2]	31.14	31.14
ue[3]	32.82	32.89
ue[4]	49.87	35.48

ue[5]	34.02	33.38
Promedio	35.8	33.31

Una vez generada la gráfica comparativa, como se puede apreciar en la Figura 91, se tiene la relación de Throughput entre las dos tecnologías de redes móviles inalámbricas, las cuales evidencian una brecha mínima de [Bps], lo que se traduce para 4G como un menor procesamiento de unidades de información por un periodo de tiempo determinado como segundo [s], dejando una limitante especialmente para los servicios que demandan efectividad en cada paquete transmitido con el fin de mantener la secuencia de la comunicación; tales como streaming, VoIP y georreferencia de unidades móviles en tiempo real. Para el caso presentado se muestra un salto en los valores para la ue [4] debido a que durante ese intervalo de tiempo no existen nodos intermedios en la transmisión, dicho evento fue considerado a razón de que es lo más cercano a un entorno real ya que es una posibilidad debido al ruido introducido en el medio inalámbrico a razón de alta movilidad vehicular y otros factores externos.

Figura 91.

Comparativa de valores de Throughput para tecnologías de radio 4G y 5G NSA



❖ Latencia

Tras haber verificado el rendimiento de la etapa inalámbrica de la red mediante su Throughput, se cuenta también con una interpretación del RLC delay en lo que se conoce como latencia, este parámetro permite evidenciar la transmisión de datos desde las UE tras haber ejecutado el establecimiento de conexión con las estaciones base de cada una de las tecnologías propuestas, sus valores se muestran en la Figura 92.

Figura 92.

Valores RLC Delay extraídos para la red MEC 5G NSA Uplink

Experiment	Meas	Replica	Module	Name	Count	Mean	StdDev	Variance
MEC_Conectividad	#0		red5G_NSA.ue[5].cellularNic.rlc.um	rlcDelayUlvector	2716	0.031574 s	0.037934 s	0.001439 s ²
MEC_Conectividad	#0		red5G_NSA.ue[4].cellularNic.rlc.um	rlcDelayUlvector	2730	0.023490 s	0.025261 s	0.000638 s ²
MEC_Conectividad	#0		red5G_NSA.ue[2].cellularNic.rlc.um	rlcDelayUlvector	2721	0.019655 s	0.033778 s	0.001141 s ²
MEC_Conectividad	#0		red5G_NSA.ue[0].cellularNic.rlc.um	rlcDelayUlvector	2745	0.014623 s	0.016460 s	0.000271 s ²
MEC_Conectividad	#0		red5G_NSA.ue[3].cellularNic.rlc.um	rlcDelayUlvector	2750	0.012605 s	0.016739 s	0.000280 s ²
MEC_Conectividad	#0		red5G_NSA.ue[1].cellularNic.rlc.um	rlcDelayUlvector	2755	0.010839 s	0.013606 s	0.000185 s ²
MEC_Conectividad	#0		red5G_NSA.ue[2].cellularNic.nrRlc.um	rlcDelayUlvector	2748	0.009069 s	0.002974 s	0.000009 s ²
MEC_Conectividad	#0		red5G_NSA.ue[4].cellularNic.nrRlc.um	rlcDelayUlvector	2751	0.008824 s	0.002436 s	0.000006 s ²
MEC_Conectividad	#0		red5G_NSA.ue[1].cellularNic.nrRlc.um	rlcDelayUlvector	2750	0.008704 s	0.002351 s	0.000006 s ²
MEC_Conectividad	#0		red5G_NSA.ue[5].cellularNic.nrRlc.um	rlcDelayUlvector	2750	0.008302 s	0.003084 s	0.000010 s ²
MEC_Conectividad	#0		red5G_NSA.ue[0].cellularNic.nrRlc.um	rlcDelayUlvector	2750	0.008260 s	0.001229 s	0.000002 s ²
MEC_Conectividad	#0		red5G_NSA.ue[3].cellularNic.nrRlc.um	rlcDelayUlvector	2750	0.007397 s	0.002418 s	0.000006 s ²

A partir de los valores mostrados en [s] se toma como referencia los límites promedio para construir la Tabla 15 en [ms] para hacer más perceptible el análisis a partir de la gráfica interpretativa generada en el plot del simulador Omnet++ que se muestra como Figura 93; esta permite apreciar la diferencia en los retrasos de la comunicación para las dos tecnologías.

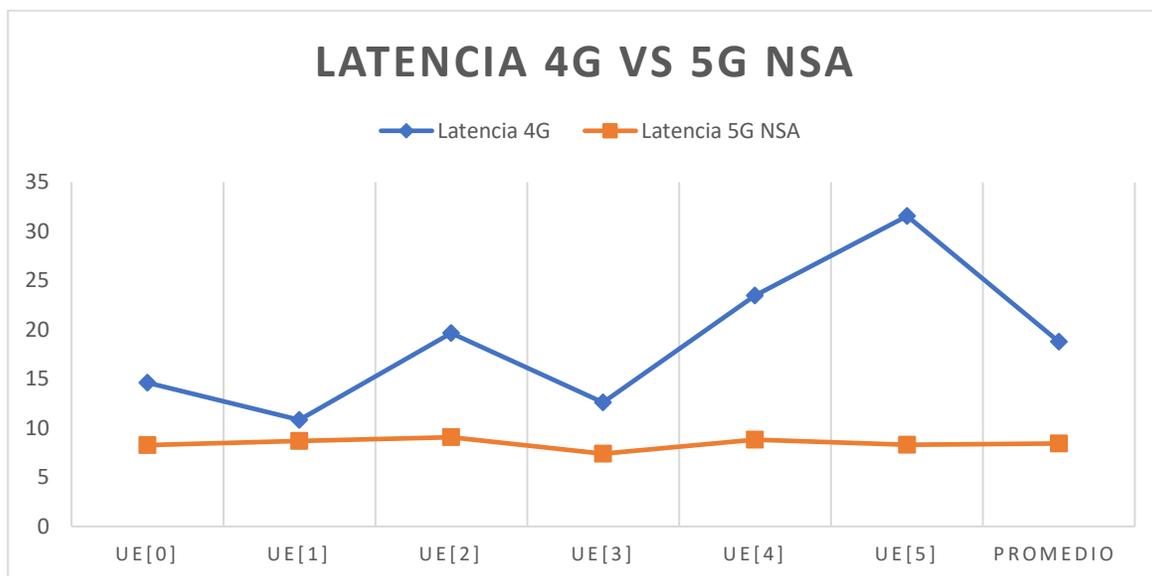
Tabla 15.

Comparativa de valores de Latencia para tecnologías de radio 4G y 5G NSA

Unidad Vehicular	Latencia 4G	Latencia 5G NSA
ue[0]	14.62	8.26
ue[1]	10.84	8.7
ue[2]	19.66	9.07
ue[3]	12.61	7.4
ue[4]	23.49	8.82
ue[5]	31.57	8.3
Promedio	18.8	8.43

Figura 93.

Comparativa de Latencia para tecnologías de radio 4G y 5G NSA



Además, es posible apreciar de manera global en la Figura 94 y de forma específica para ue[0] en la Figura 95; que 4G en color naranja tiene mayores márgenes de retraso en la comunicación lo que disminuye la capacidad de integrarse en servicios de tiempo real, a diferencia de ello para 5G en color azul la recepción y transmisión de datos por parte de su estación base gNodeB cuenta con una menor latencia, lo cual prioriza una comunicación efectiva con mínimos retardos permitiendo a cualquier usuario percibir datos casi en tiempo real.

Figura 94.

Comparativa global de latencia en transmisiones para tecnologías de radio 4G y 5G NSA

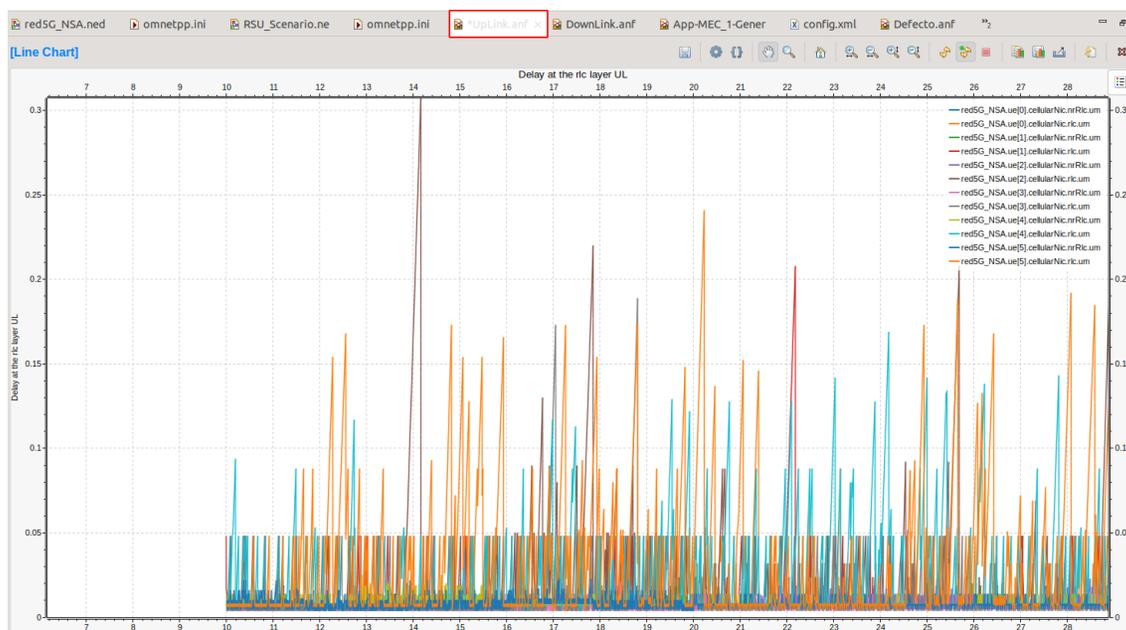
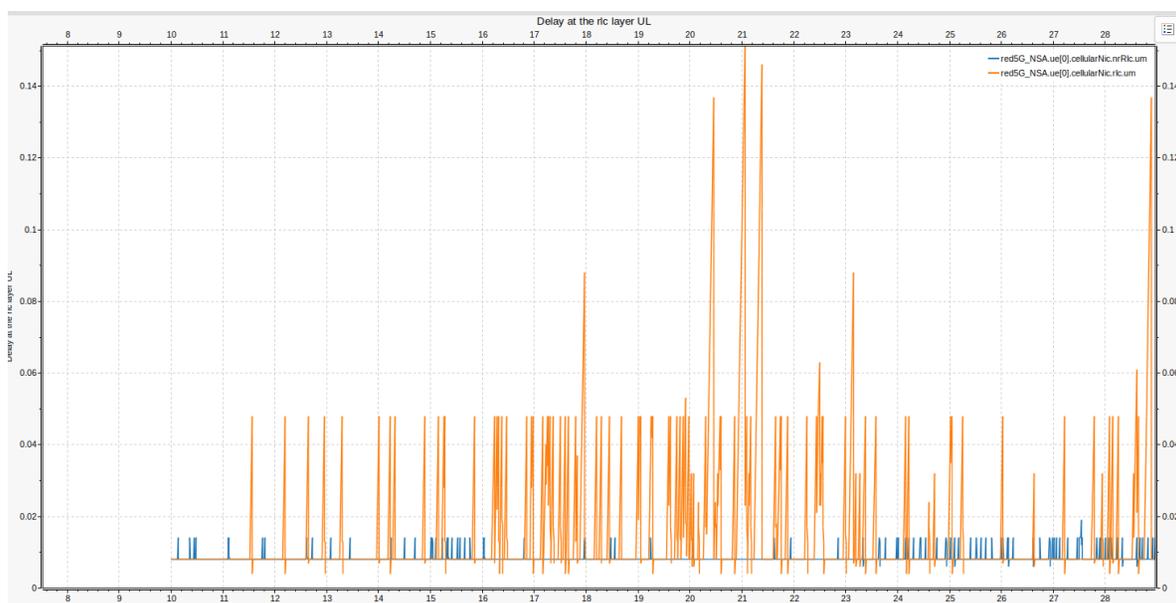


Figura 95.

Comparativa específica ue[0] de latencia en transmisiones para tecnologías de radio 4G y 5G NSA



❖ Jitter

A partir de los valores de tiempo mostrados en el análisis anterior correspondientes a latencias se procede a realizar el cálculo del jitter como una referencia de rendimiento de la red, este valor corresponde a la variación de retardo entre unidades de información que se envían/reciben y se calcula de acuerdo con las Ecuaciones 2 y 3 (Tanenbaum & Wetherall, 2012) para cada una de las tecnologías que intervienen en los entornos inalámbricos de la red de comunicación propuesta, en dichas ecuaciones se denota cada valor de latencia con el índice X_n haciendo referencia n al orden obtenido.

Ecuación 2.

Cálculo de jitter

$$\text{Promedio de diferencias (Jitter)} = \frac{(X_2 - X_1) + (X_3 - X_2) + (X_4 - X_3) + (X_{n=5} - X_{n-1})}{n - 1}$$

Ecuación 3.

Cálculo de desviación estándar para jitter

$$\text{Desviación estándar (S)} = \sqrt{\left(\frac{\sum(X_n - \text{promedio})^2}{n - 1}\right)}$$

A continuación se muestra el proceso de cálculo de jitter para los escenarios planteados:

- **Cálculo de Jitter en el entorno 4G:**

Se cuenta con los siguientes valores originales de latencia en [s] recopilados a partir de la Tabla 15: 0.01462, 0.01084, 0.01966, 0.01261, 0.02349, 0.03157; a partir de ello se procede como a continuación se indica.

En primer lugar, se calcula las diferencias para cada par de valores consecutivos de latencia, y por consiguiente el promedio de estas, el cual se conoce como retardo de transmisión o jitter.

- (0.01084 y 0.01462) = 0.00378
- (0.01966 y 0.01084) = 0.00882
- (0.01261 y 0.01966) = 0.00705
- (0.02349 y 0.01261) = 0.01088
- (0.03157 y 0.02349) = 0.00808

$$Jitter = \frac{0.00378 + 0.00882 + 0.00705 + 0.01088 + 0.00808}{5} = \frac{0.03861}{5}$$

$$Jitter = 0.007722 [s] = 7.72 [ms]$$

A partir del valor promedio se procede con el cálculo de la desviación estándar S de las diferencias, que para el caso se denominan muestras; esto con el fin de determinar un grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio, es decir que tan lejos o cerca puede variar el jitter; obteniendo el siguiente resultado:

$$S = ((0.00378 - 0.007722)^2 + (0.00882 - 0.007722)^2 + (0.00705 - 0.007722)^2 + (0.01088 - 0.007722)^2 + (0.00808 - 0.007722)^2) / 5$$

$$S = \frac{(-0.003942)^2 + (0.001098)^2 + (-0.000672)^2 + (0.003158)^2 + (0.000358)^2}{5}$$

$$S = \frac{1.55394e^{-5} + 1.2056e^{-6} + 4.5158e^{-7} + 9.97296e^{-6} + 1.28164e^{-7}}{5}$$

$$S = 5.45954e^{-6} [s] = 0.00546 [ms]$$

Por lo tanto, la variación de jitter en la transmisión va a ser $\pm 5.46e^{-6}$ a partir del valor central $7.72 [ms]$ para la red de comunicación con tecnología de transmisión 4G para el entorno planteado.

▪ **Cálculo de Jitter en el entorno 5G NSA:**

Se cuenta con los siguientes valores originales de latencia en [s] recopilados a partir de la Tabla 15: 0.00826, 0.00870, 0.00907, 0.00740, 0.00882, 0.00830; a partir de ello se procede como a continuación se indica.

En primer lugar, se calcula las diferencias para cada par de valores consecutivos de latencia, y por consiguiente el promedio de estas, el cual se conoce como retardo de transmisión o jitter.

- $(0.00826 \text{ y } 0.00870) = 0.00044$
- $(0.00870 \text{ y } 0.00907) = 0.00037$
- $(0.00907 \text{ y } 0.00740) = 0.00167$
- $(0.00740 \text{ y } 0.00882) = 0.00142$
- $(0.00882 \text{ y } 0.00830) = 0.00052$

$$Jitter = \frac{0.00044 + 0.00037 + 0.00167 + 0.00142 + 0.00052}{5} = \frac{0.00442}{5}$$

$$Jitter = 0.000884 [s] = 0.88 [ms]$$

A partir del valor promedio se procede con el cálculo de la desviación estándar S de las diferencias, que para el caso se denominan muestras; esto con el fin de determinar un grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio, es decir que tan lejos o cerca puede variar el jitter; obteniendo el siguiente resultado:

$$S = ((0.00044 - 0.000884)^2 + (0.00037 - 0.000884)^2 + (0.00167 - 0.000884)^2 + (0.00142 - 0.000884)^2 + (0.00052 - 0.000884)^2) / 5$$

$$S = \frac{(-0.000444)^2 + (-0.000514)^2 + (0.000786)^2 + (0.000536)^2 + (-0.000364)^2}{5}$$

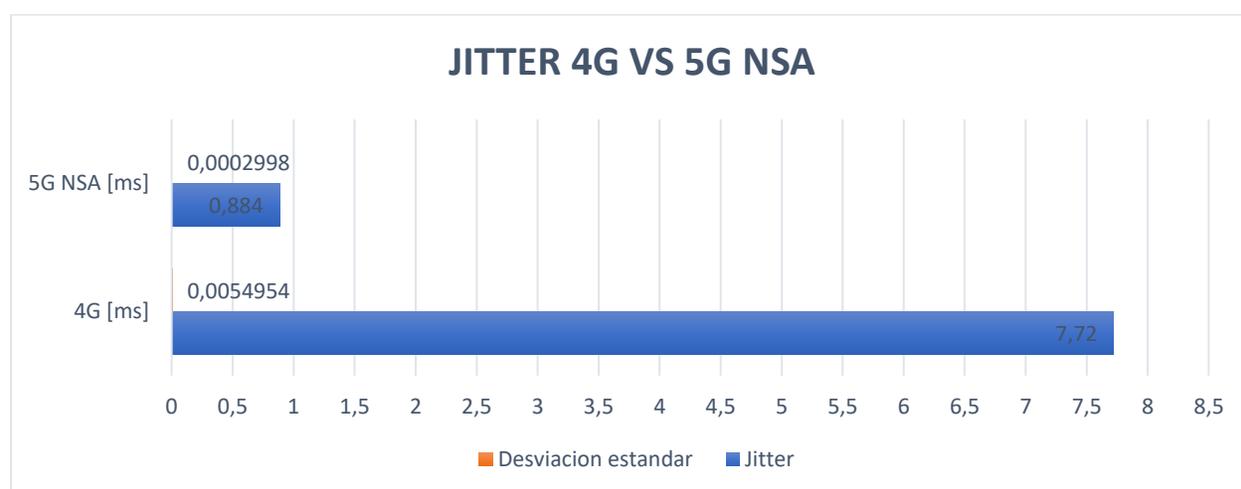
$$S = \frac{1.9714e^{-7} + 2.642e^{-7} + 6.178e^{-7} + 2.873e^{-7} + 1.325e^{-7}}{5}$$

$$S = 2.998e^{-7} [s] = 0.0002998 [ms]$$

Por lo tanto, la variación de jitter en la transmisión va a ser $\pm 2.998e^{-7} [s]$ a partir del valor central 0,000884 para la red de comunicación con tecnología de transmisión 5G NSA para el entorno planteado; para el análisis gráfico respectivo a continuación en la Figura 96 se muestra una comparativa en el retraso de transmisión de las 2 tecnologías en base a su jitter y desviación estándar.

Figura 96.

Comparativa de jitter en transmisiones para tecnologías de radio 4G y 5G NSA



❖ Calidad de canal inalámbrico

El entorno de simulación 5G NSA permite extraer un reporte de análisis de nivel de calidad de la señal en el enlace Uplink/Downlink para los usuarios en red, que para el caso se definen como 6 UEs; dichos equipos terminales transmiten indicadores CQI a las estaciones base, los cuales son escalares entre 0 – 15 y se interpretan de tal forma que el valor más alto corresponde a la mejor calidad de comunicación en función de la señal recibida y el valor de interferencia señal ruido conocido como SNI; en las Figuras 97 y 98 se dan a conocer el nivel de CQI por usuario a partir de los valores de resultados extraídos del archivo `averageCqiUL:mean`, el cual se encuentra en la sección vectores del `.anf` generado como resultado para el entorno UpLink, , dichos valores son recopilados y se muestran en la Tabla 16 para su posterior interpretación.

Figura 97.

Valores CQI para transmisiones UE - estación base eNodeB 4G

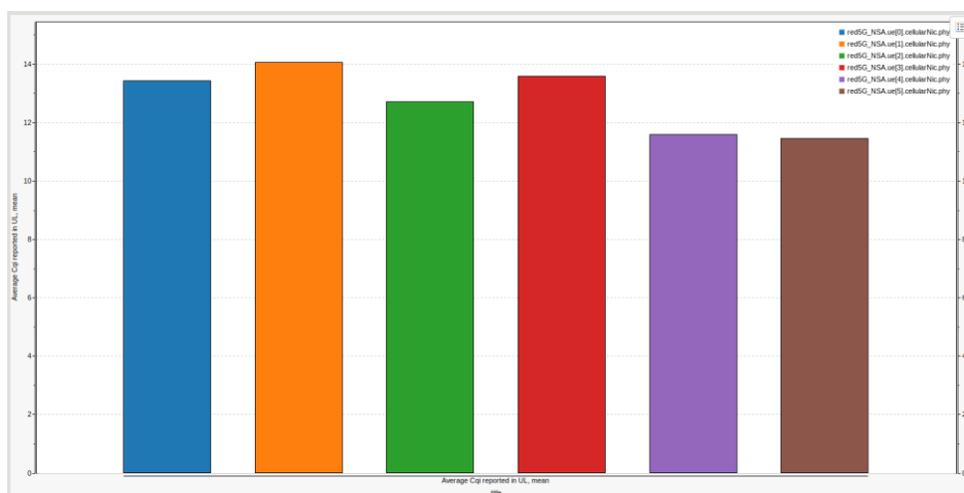
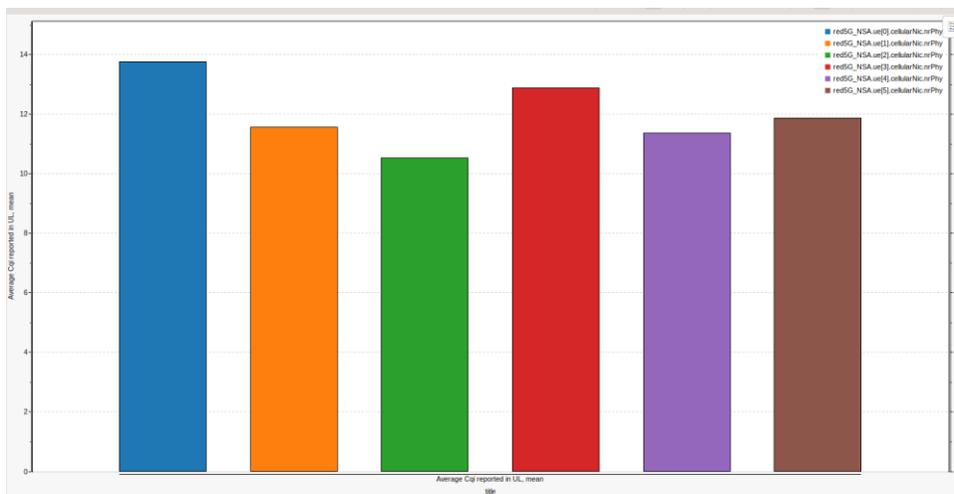


Figura 98.

Valores CQI para transmisiones UE - estación base gNodeB 5G

**Tabla 16.**

Valores CQI para transmisiones UE - estaciones base 4G y 5G NSA

Unidad vehicular	Índice CQI	
	Radio 4G	NR 5G NSA
ue[0]	13.420	13.760
ue[1]	14.060	11.578
ue[2]	12.707	10.546
ue[3]	13.594	12.898
ue[4]	11.603	11.364
ue[5]	11.459	11.868

A partir de las gráficas obtenidas se procede a realizar la comparativa de calidad de canal para el entorno inalámbrico 4G y 5G en la Figura 99 ya que cada una de las barras muestra la transmisión CQI para la capa física de NR y LTE radio respectivamente; los valores más altos hacen referencia a la técnica de modulación mejorada, misma que se interpreta en picos de entre

10 y 14 como 64-QAM cuya eficiencia espectral esta entre 2.7305 y 5.1152 de tasa de perdida de bits por símbolo de acuerdo a la Tabla 17 emitida por el organismo regulador 3GPP en conjunto con el ETSI.

Tabla 17.

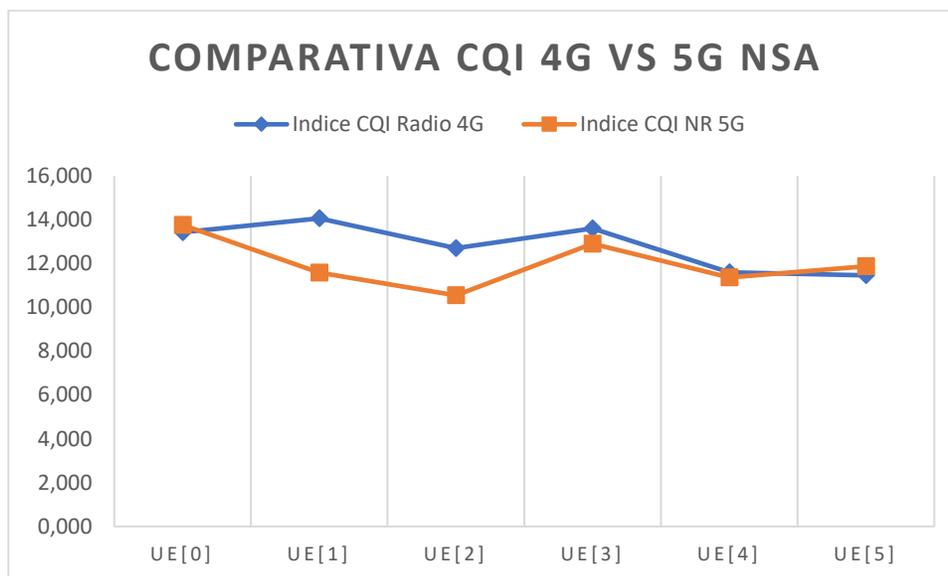
Valores de referencia CQI

Índice CQI	Modulación	Code Rate x 1024	Eficiencia
0		Fuera de rango	
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	120	0.2344
3	QPSK	193	0.377
4	QPSK	308	0.6016
5	QPSK	449	0.877
6	QPSK	602	1.1758
7	16-QAM	378	1.4766
8	16-QAM	490	1.9141
9	16-QAM	616	2.4063
10	64-QAM	466	2.7305
11	64-QAM	567	3.3223
12	64-QAM	666	3.9023
13	64-QAM	772	4.5234
14	64-QAM	873	5.1152
15	64-QAM	948	5.5547

Fuente. (3GPP & ETSI, 2022)

Figura 99.

Comparativa de valores de CQI para tecnologías de radio 4G y 5G NSA



4.3 Discusión

Luego de haber realizado una investigación teórica sobre las tecnologías evaluadas en este proyecto, se diseñó un sistema de comunicación convergente para cumplir con el alcance planteado; los resultados son una comparativa de métricas de valor respecto a la transmisión de datos sobre la red, estos se detallan en el apartado **4.4.2 Análisis de resultados** y sirven como soporte para emitir un criterio de impacto respecto a la implementación de MEC en una red 5G.

Con la implementación de la tecnología MEC mejora significativamente el rendimiento en la transmisión de información, lo que en el ambiente de aplicabilidad sugerido se traduce como una actualización con mínimo retraso en la información capturada sobre el estado de las rutas vehiculares de los autobuses de transporte público en paradas inteligentes de la ciudad de Ibarra. Según la información presentada en la Tabla 15, se observa una mejora significativa en la latencia para la tecnología 5G NSA con respecto a 4G, con un 54.76% con el sistema MEC, lo que aumenta la tasa de actualización de información en el equipo terminal del entorno, conocido como paradas inteligentes. Este hallazgo sugiere que la tecnología MEC con 5G NSA es una opción viable para mejorar el rendimiento de un sistema de comunicación que soporta un servicio que exige una comunicación casi en tiempo real para ofrecer la mejor calidad a los usuarios.

Los resultados obtenidos tienen una variación en comparación con una implementación en entorno real, ya que en este se considera una mayor cantidad de interferencias, las cuales en el ambiente de simulación no pueden ser implementadas por completo y de forma exacta.

5 CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del presente estudio y al culminar el mismo se logró extraer las siguientes conclusiones, mismas que reafirman criterios técnicos y de ingeniería respecto a redes de transporte de quinta generación y tecnologías asociadas.

- La revisión de aspectos técnicos y de aplicabilidad referentes a las tecnologías MEC, Comunicación Vehicular V2X y redes inalámbricas de quinta generación 5G permitió una adecuada y concreta sustentación de marco teórico para a posterior dar soporte a una etapa acertada de desarrollo del proyecto bajo criterios de ingeniería.
- La plataforma de simulación Omnet++ en su versión 6.0 es la más estable hasta la fecha para simular las tecnologías propuestas en este proyecto, ya que dicha herramienta permite integrar varios módulos y submódulos en conjunto con el framework INET, dando paso a la convergencia de redes cableadas e inalámbricas fundamentalmente bajo la implementación del protocolo IP.
- Las simulaciones mostradas en el presente proyecto se ejecutaron en un intervalo de tiempo definido debido al uso de recursos del ordenador anfitrión, debido al número de procesos a ejecutar por unidad de tiempo. Para el caso de la red de movilidad vehicular, se consideró un intervalo de 200 [s], ya que los elementos de red son únicamente las UE y RSU en una interacción enmarcada hasta la cuarta capa del modelo OSI. Mientras que para la red de tratamiento de información denominada 5G NSA se definió 30 [s], ya que los eventos de la simulación se ejecutan para cada proceso de comunicación en elementos alámbricos e

inalámbricos. Al igual que en el otro caso, su evaluación se delimitó hasta la capa de transporte del modelo de referencia OSI.

- Los resultados obtenidos en la simulación indican que la red 5G NSA tiene una latencia promedio de 0.00843 [s] y en base a ello un jitter de 0.000884 , lo que es significativamente menor en comparación con la red 4G, cuya latencia promedio es 0.01880 [s] y jitter de 0.007722 para el servicio V2X de actualización de rutas vehiculares. Esto se debe a que la tecnología 5G ofrece mayores tasas de transferencia de datos y menores tiempos de retardo, lo que permite una mayor eficiencia en la transmisión de información.

6 RECOMENDACIONES

Con el fin de presentar el presente estudio para posteriores investigaciones y tras haber experimentado fases de diseño y ejecución del proyecto, a continuación se da a conocer las siguientes recomendaciones, las cuales permitirán fortalecer criterios de desarrollo y a la vez generar una visión más profunda de aplicabilidad de las tecnologías planteadas.

- La correcta aplicación de la metodología de desarrollo de proyectos escogida en conjunto con buenas prácticas, aumentan el nivel de éxito del mismo en base a los indicadores planteados, para ello es recomendable mantener una comunicación directa y periódica con los stakeholders, principalmente en las etapas de estudio del arte y diseño de la red de comunicación, de esta forma se optimiza el uso de recursos, se reduce el tiempo de ejecución de procesos y por consiguiente se delimitan resultados de alto valor.
- Es recomendable verificar la prioridad de los procesos que se están ejecutando al momento de realizar la simulación sobre Omnet++ en el sistema operativo Ubuntu/Linux, para ello se optó por el comando *ps all*, esto permite observar la prioridad de cada proceso; una vez chequeado dicho valor para el simulador y procesos adyacentes se establece el mismo con prioridad de entre -20 como prioridad más alta a 19 como prioridad más baja, para ello se ejecuta el comando *renice -n 20 -p [PID]*, de esta forma se reduce el tiempo que le toma al ordenador ejecutar la simulación, permitiendo así simular una gran cantidad de eventos discretos de forma óptima.
- Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan un punto de partida para posteriores evaluaciones en relación con los recursos disponibles en Ecuador y

pueden ser utilizados para tomar decisiones informadas sobre la implementación de tecnologías avanzadas en redes vehiculares en el país. Por ello, se recomienda para futuras investigaciones relacionadas explorar la posibilidad de integrar otras tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y el Internet de las cosas, con el fin de mejorar aún más el rendimiento de las redes vehiculares; además, se recomienda realizar estudios de costo-beneficio para determinar la viabilidad económica de la implementación de estas tecnologías.

7 BIBLIOGRAFÍA

- 3GPP, & ETSI. (2022, September). *ETSI TS 138 214 V17.3.0 (2022-09) 5G; NR; Physical layer procedures for data (3GPP TS 38.214 version 17.3.0 Release 17)*.
https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138214/17.03.00_60/ts_138214v170300p.pdf
- Álvarez Campana, M. (2015). *Curso LTE 3.Arquitectura Funcional y protocolos*.
<http://catedraisdefe.etsit.upm.es/wp-content/uploads/2015/04/Manuel-Alvarez-Campana-T3.pdf>
- BetterMing. (2021, July 20). *[Introducción al 5G] Diferencia entre eNodeB y gNodeB - Huawei Enterprise Support Community*. HUAWEI Foros.
<https://forum.huawei.com/enterprise/en/introduction-to-5g-difference-between-enodeb-and-gnodeb/thread/757531-100305>
- Buenaño Silva, D. P., & Terán Suárez, D. A. (2020). *ESTUDIO DE LA INFRAESTRUCTURA Y EL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA 5G EN LAS CIUDADES DE QUITO Y GUAYAQUIL*. [UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO].
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19251/4/UPS%20-%20TTS154.pdf>
- Caicedo Bastidas, A. G., & Martínez Ojeda, J. M. (2011). *EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE REDES 802.11P/WAVE EN LA TRANSMISIÓN DE DATOS, VOZ Y VIDEO IP*. UNIVERSIDAD DEL CAUCA .
- Calle Cáceres, C. I. (2013). *ESTUDIO Y ANÁLISIS TÉCNICO COMPARATIVO ENTRE LAS TECNOLOGÍAS 4G LONG TERM EVOLUTION (LTE) Y LTE ADVANCED*. EPN.

- Cangás Cangás, F. X. (2021). *Informe Nro.: EPM-DDP-2021-000-21 Situación actual de la infraestructura de las paradas interactivas de la Empresa Pública de Movilidad del Norte MOVIDELNOR.*
- Celis Lima, I. A. (2021). *Propuesta de marco de trabajo para la implementación de Smart City en Bogotá.* <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/42765>
- Coll-Perales, B., Carmen Lucas-Estan, M., Wang, C. H., Gozálvez, J., Shimizu, T., Avedisov, S., Sepulcre, M., Higuchi, T., Cheng, B., Yamamuro, A., & Altintas, O. (2021, March 9). Impact of the MEC Location in Transport Networks on the Capacity of 5G to Support V2X Services. *16th Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services, WONS 2021.* <https://doi.org/10.23919/WONS51326.2021.9415554>
- Comesaña Hermida, S. (2022). *Diseño de corredores de prioridad dinámico para vehículos de emergencia basados en V2X.* [Universitat Oberta de Catalunya]. <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/137709/6/scomesanaTFM0122memoria.pdf>
- Consejo Nacional de Planificación (CNP). (2017). *Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021-Toda una Vida.* www.planificacion.gob.ec
- DiarioELNORTE. (2021). *¿Paradas de buses, proyecto que no tuvo buen resultado? - Diario EL NORTE.* https://www.elnorte.ec/paradas-de-buses-proyecto-que-no-tuvo-buen-resultado/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=paradas-de-buses-proyecto-que-no-tuvo-buen-resultado

- Díaz Tituaña, F. M. (2019). Caracterización de las rutas de buses de transporte público de la ciudad de Ibarra para la implementación de buses híbridos y eléctricos GPS. [UTN]. In *Universidad Técnica del Norte*. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8894>
- doc.omnetpp.org. (2021). *OMNeT++ User Guide Version 6.0*. <https://doc.omnetpp.org/omnetpp/UserGuide.pdf>
- electronicsnotes. (2022, February 17). *UMTS UTRA / UTRAN: Radio Network Subsystem RNS*. UMTS UTRA / UTRAN. <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/3g-umts/radio-access-network-utra-utran.php>
- eSMARTCITY.es. (2022, March). *Medio Ambiente • ESMARTCITY*. Medio Ambiente. <https://www.esmartcity.es/medio-ambiente>
- Espinosa, M. (2015). *Paradas de bus inteligentes en el paseo de Gracia*. <https://www.atuc.es/sites/default/files/barcelona-paradas-de-bus-inteligentes-en-el-paseo-de-gracia.pdf>
- ETSI. (2017). ETSI TS 136 410 - V14.0.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 general aspects and principles (3GPP TS 36.410 version 14.0.0 Release 14). *ETSI TECHNICAL SPECIFICATION*. <https://portal.etsi.org/TB/ETSIDeliverableStatus.aspx>
- ETSI. (2021). *ETSI - Multi-access Edge Computing - Standards for MEC*. <https://www.etsi.org/technologies/multi-access-edge-computing>
- ETSI. (2022, March 4). *ETSI - Multi-access Edge Computing - Standards for MEC*. TECHNOLOGIES. <https://www.etsi.org/technologies/multi-access-edge-computing>

EXPECTATIVA. (2018, December 26). *Paradas inteligentes no prestan servicio original – Periodico Expectativa – Noticias de Ibarra Imbabura Ecuador*. Paradas Inteligentes No Prestan Servicio Original. <http://www.expectativa.ec/paradas-inteligentes-no-prestan-servicio-original/>

Faruk, N., & Gumel, M. (2015). *3G Network Initial Pilot Coverage Design and Optimization*. JANUARY 2011, 99.

Federal Communications Commission. (2018). *STATEMENT OF CHAIRMAN AJIT PAI - Use of the 5.850-5.925 GHz Band, ET Docket No. 19-308*. 18, 86.

GAD Imbabura. (2022, May 12). *Prefectura de Imbabura - Inicio*. <https://www.imbabura.gob.ec/>

GAD Ibarra. (2022, June 2). *Transporte público – Geoportal – Ibarra*. <https://www.ibarra.gob.ec/site/geoportal/transporte-publico/>

GoogleMaps. (2022, May). *Calles Eusebio Borrero – Antonio José de Sucre – Av. Pérez Guerrero – Chica – Narvárez*. <https://www.google.com.ec/maps/place/Eusebio+Borrero,+Ibarra/@0.3515279,-78.1202775,16z/data=!4m5!3m4!1s0x8e2a3cb13998eb17:0x95b9cc56f209fe54!8m2!3d0.3535665!4d-78.1178355?hl=es>

Intriago Cobeña, M. E. (2018). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA COMUNICACIÓN NALÁMBRICA EN EL SISTEMA INTEGRADO AMBULATORIO DE PRESIÓN ARTERIAL* [Universidad Técnica de Ambato]. https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/27206/1/Tesis_%20t1364ec.pdf

- ISO/IEC. (2018). *ISO/IEC/IEEE 29148:2018(E), Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec-ieee:29148:ed-2:v1:en>
- Kekki, S., Featherstone, W., Fang, Y., Kuure, P., Li, A., Ranjan, A., Purkayastha, D., Jiangping, F., Frydman, D., Verin, G., Wen, K.-W., Kim, K., Arora, R., Odgers, A., Contreras, L. M., & Scarpina, S. (2018). ETSI White Paper No. 28 MEC in 5G networks. *ETSI*. www.etsi.org
- LaHora. (2019, February 13). *Ibarra se acopla a la era digital*. <https://www.pressreader.com/ecuador/la-hora-carchi/20190213/282102047934317>
- LAHORA. (2021, May 13). *Transporte urbano de Ibarra se paralizó por el incremento del precio del diésel | Diario La Hora*. <https://www.lahora.com.ec/imbabura-carchi/transporte-urbano-de-ibarra-se-paralizo-por-el-incremento-del-diesel/>
- Leppänen, T. (2019). Distributed artificial intelligence with multi-agent systems for MEC. *Proceedings - International Conference on Computer Communications and Networks, ICCCN, 2019-July*. <https://doi.org/10.1109/ICCCN.2019.8846960>
- Lucas Jurado, C. A. (2015). *CONSTRUCCIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE UNA ARQUITECTURA DE RED DE DATA CENTER USANDO ns-3* [UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE GUAYAQUIL]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10345/1/UPS-GT001268.pdf>
- Maestre Góngora, G. P., & Nieto Bernal, W. (2015). Factores Clave en la Gestión de Tecnología de Información para Sistemas de Gobierno Inteligente. *J. Technol. Manag. Innov.* 2015, 10(4). <https://scielo.conicyt.cl/pdf/jotmi/v10n4/art12.pdf>

maplover. (2022, May 12). *Pin en Maps*. <https://www.pinterest.es/pin/410601691034039214/>

Marcillo del Castillo, J. R. (2020). *MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE CONTROL DE TRÁFICO VEHICULAR EN HORAS PICO PARA EL CENTRO DE LA CIUDAD DE IBARRA, A TRAVÉS DE UNA RED AD - HOC VANET* [UTN].
<http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/10923/2/Pg%20804%20TRABAJO%20GRADO.pdf>

Mereci Apolo, F. J. (2020). *DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UNA CELDA CELULAR CON TECNOLOGIAS 2G, 3G Y LTE PARA LA CIUDAD DE SAN JOSE DE CHIMBO EN LA PROVINCIA DE BOLIVAR* [ESCUELA POLITECNICA NACIONAL].
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20780/1/CD%2010300.pdf>

Millan, R. (2019). *Tecnologías y funciones de la red troncal 5G*. Conectronica N° 221.
<https://www.ramonmillan.com/tutoriales/5gcore.php>

Mohanty, S., Agarwal, A., Agarwal, K., Mali, S., & Misra, G. (2021). Role of millimeter wave for future 5G mobile networks: Its potential, prospects and challenges. *1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology, ODICON 2021*. <https://doi.org/10.1109/ODICON50556.2021.9429017>

Moscardó García, G. (2021). *“ESTUDIO DE LAS APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA 5G A REDES VEHICULARES Y VEHÍCULOS AUTÓNOMOS”* [ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA].
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/172099/Moscardo%20-%20Estudio%20de%20las%20aplicaciones%20de%20la%20tecnologia%205G%20a%20redes%20vehiculares%20y%20vehiculos%20autono....pdf?sequence=1>

- Mu, N., Gong, S., Sun, W., & Gan, Q. (2020). The 5G MEC Applications in Smart Manufacturing. *Proceedings - 2020 IEEE 13th International Conference on Edge Computing, EDGE 2020*, 45–48. <https://doi.org/10.1109/EDGE50951.2020.00014>
- Narváez Ortiz, E. E. (2018). “ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL SERVICIO DE REDES MÓVILES EN EL SECTOR DE LA TRONCAL” [UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL]. <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/36181/1/EDWIN%20ESTEBAN%20NARVAEZ%20ORTIZ%20SUSTENTACION%20TESIS.pdf>
- Noferi, A., Nardini, G., Stea, G., & Viridis, A. (n.d.). *Deployment and configuration of MEC apps with Simu5G*. <https://github.com/Unipisa/Simu5G>
- NSNAM. (2022, April 16). *Acerca de / ns-3*. <https://www.nsnam.org/about/>
- ocw.upm.es. (2022). *Capítulo 9: Sistema UMTS*. http://ocw.upm.es/pluginfile.php/1140/mod_label/intro/Tr_9.pdf
- OMNeT++. (2022, March 25). *Simulador de eventos discretos OMNeT++*. <https://omnetpp.org/>
- OPNET. (2022, April 16). *OPNET Network Simulator - Opnet Projects*. <https://opnetprojects.com/opnet-network-simulator/>
- Ortiz Campos, N. (2022). Análisis de la Arquitectura 5G en Relación a la Opción no Autónoma de la Asociación Global del Ecosistema Móvil (GSMA). *IDEAS-UTN*. <http://revistasojs.utn.edu.ec/index.php/ideas/article/view/622/572>
- Pascual Belda, E. (2019). *Short Range and Cellular V2X Communication* [TECNOLÓGICO DE MONTERREY]. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/152454/Pascual%20->

%20Comunicaci%C3%B3n%20V2X%20de%20corto%20alcance%20y%20celular..pdf?sequence=1

programadorclick.com. (2022, April 1). *Software de simulación del sistema de transporte-SUMO - programador clic*. SUMO. <https://programmerclick.com/article/9022256444/>

Raza, N., Jabbar, S., Han, J., & Han, K. (2018, June 26). Social Vehicle-To-Everything (V2X) communication model for Intelligent Transportation Systems based on 5G scenario. *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/3231053.3231120>

Sánchez, J. A. (2017). *Redes Vehiculares Aplicadas a la Movilidad Inteligente y Sostenibilidad Ambiental en Entornos de Ciudades Inteligentes* [Universidad de Oviedo]. https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/45013/TD_JoseAntonioSanchez.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Sandoval Vásquez, C. O. (2018). *SISTEMA DE MONITOREO DE RED CELULAR MÓVIL 2G/3G EMPRESA ENTEL PERÚ S.A.C.* [UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO LUIS GALLO”]. <https://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/2494/BC-TESTMP-1366.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

SIMU5G. (2022, April 16). *Simu5G - 5G New Radio User Plane Simulator for OMNeT++ and INET*. <http://www.simu5g.org/>

Sittón Candanedo, I. (2020). *Arquitectura Inteligente Edge Computing para entornos IoT* [Universidad de Salamanca]. https://gredos.usal.es/bitstream/handle/10366/143827/REDUCIDA_SittonI.pdf;jsessionid=3C89D6EA7F40D6A360A35A2E1097CE1B?sequence=1

sumo.dlr.de. (2022, April 1). *Documentation - SUMO Documentation*. SUMO.
<https://sumo.dlr.de/docs/index.html>

Tanenbaum, A. S., & Wetherall, D. J. (2012). *Redes de computadoras*. Pearson Educación.

Tomasi, W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas* (Cuarto). PEARSON EDUCACIÓN.
<http://fernandoarciniega.com/books/sistemas-de-comunicaciones-electronicas-tomasi-4ta-edicion.pdf>

Torres Samuel, M. (2020). Caracterización de buenas prácticas en la elicitación de requisitos de software referidas en el estándar ISO/IEC/IEEE 29148. *Research*.
https://www.researchgate.net/publication/353157114_Caracterizacion_de_buenas_practicas_en_la_elicitacion_de_requisitos_de_software_referidas_en_el_estandar_ISOIECIEEEE_29148

TVNCanal. (2015, October 1). *Paradas inteligentes en Ibarra aún no cumplen su función* (Noticias Ecuador). TvnCanal. <https://www.youtube.com/watch?v=S3nFu2O2FDk>

TVNCanal. (2016, September 27). *Ibarra cuenta con las primeras 8 paradas inteligentes* (Noticias Ecuador). TVNCanal . <https://www.youtube.com/watch?v=E110CUJWdR8>

UDLAP. (2022). *Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE UMTS*.
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/lopez_g_j/capitulo2.pdf

UIT. (2021, December). *Ciudades inteligentes y sostenibles*. Centro de Prensa .
<https://www.itu.int/es/mediacentre/backgrounders/Pages/smart-sustainable-cities.aspx>

Ulloa Saltos, A. C. (2018). *ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA 5G Y EL IMPACTO QUE TENDRÁ EN EL PAÍS* [Universidad de Guayaquil].

<http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/36307/1/Estudio%20de%20la%20tecnolog%C3%ADa%205G%20y%20el%20impacto%20que%20tendr%C3%A1%20en%20el%20pa%C3%ADs.pdf>

UNDP. (2022, March 16). *Smart Cities*. Singapore Global Centre for Technology, Innovation and Sustainable Development. https://sgtechcentre.undp.org/content/sgtechcentre/en/home/our-focus-areas/smart-cities.html?utm_source=EN&utm_medium=GSR&utm_content=US_UNDP_PaidSearch_Brand_English&utm_campaign=CENTRAL&c_src=CENTRAL&c_src2=GSR&gclid=EAIAIQobChMI49Kk993K9gIVCZ2zCh3R8w9GEAAAYAiAAEgIhsfD_BwE

Valentín Rojas, F. D. (2021). *PROSPECTIVA TECNOLÓGICA DEL 5G EN EL DESARROLLO DE SMART CITY: CASO SMART MOBILITY EN LIMA AL 2030* [PUCP]. https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/21109/Valent%c3%adn_Rojas_Prospectiva_tecnol%c3%b3gica_5G.pdf?sequence=1&isAllowed=y

veins. (2022, April 5). *Veins*. <https://veins.car2x.org/>

VIALVI. (2022, February 24). *Arquitectura de las redes 5G. Núcleo de red, redes RAN y arquitectura de seguridad para la tecnología 5G*. <https://www.viavisolutions.com/es-es/arquitectura-de-la-tecnologia-5g>

Viscaino Gavilanes, J. J. (2018). *EVALUACION DE RENDIMIENTO DE LAS TECNOLOGIAS 802.11 Y LTE PARA PROVEER SERVICIOS WEB EN REDES VEHICULARES AD-HOC*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.

www.ipv6go.net. (2022, February). *Arquitectura de una red LTE*. http://www.ipv6go.net/lte/arquitectura_red_lte.php

www.nperf.com. (2022a, November 1). *Cobertura 3G / 4G / 5G Claro Movil en Ibarra, Ecuador* - nPerf.com. <https://www.nperf.com/es/map/EC/3655673.Ibarra/8263.Claro-Movil/signal/>

www.nperf.com. (2022b, November 1). *Cobertura 3G / 4G / 5G CNT Movil en Ibarra, Ecuador* - nPerf.com. <https://www.nperf.com/es/map/EC/3655673.Ibarra/163678.CNT-Movil/signal/>

www.nperf.com. (2022c, November 1). *Cobertura 3G / 4G / 5G Movistar Movil en Ibarra, Ecuador* - nPerf.com. <https://www.nperf.com/es/map/EC/3655673.Ibarra/11134.Movistar-Movil/signal/>

www.tuenti.ec. (2022, November 1). *Mapa de Cobertura | Tuenti Ecuador*. <https://www.tuenti.ec/mapa-de-cobertura-tuenti>

Zambrano Martínez, J. L. (2015). *Sistema centralizado para la optimización del tráfico mediante un servidor de rutas Efficient Traffic Management in Urban Environments View project*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16661.63205>

ZICLA. (2017, October 23). *Zicla Blog | Paradas de bus inteligentes. Qué son y por qué son buenas*. <https://www.zicla.com/blog/paradas-de-bus-inteligentes/>

8 ANEXOS

8.1 ANEXO A: FORMATO DE ENTREVISTA REALIZADA A FUNCIONARIO/S MOVIDELNOR E.P.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y REDES DE COMUNICACIÓN

Proyecto tesis: Análisis de desempeño de la tecnología MultiAccess Edge Computing (MEC) bajo comunicación V2X en redes inalámbricas de quinta generación para la actualización de rutas de autobuses de transporte público sobre paradas inteligentes en la ciudad de Ibarra.

Objetivo entrevista: Obtener información relevante mediante entrevista realizada a uno o varios funcionarios de Movidelnor E.P acerca de la operación, características y estado actual del proyecto “Paradas Interactivas” implementado en la ciudad de Ibarra, para realizar un proyecto de investigación dentro del marco Trabajo de Grado.

Guía de entrevista

Nombre del entrevistado:

Cargo ejercido del entrevistado:

Nombre del entrevistador:

Fecha:

1. ¿Cuál fue el objetivo general de la implementación del proyecto y que funciones se pretendió ejecutar?
2. ¿Cuáles son las características del proyecto a nivel operativo?
3. ¿Qué equipos tecnológicos se utilizaron para montar la infraestructura de las paradas interactivas de transporte público urbano?
4. ¿Se ha planteado un plan de continuidad del proyecto mediante la integración de nuevos equipos o tecnologías? Si la respuesta es afirmativa, ¿Qué servicios se pretenden brindar?
5. Considera que el proyecto tuvo impacto en el desarrollo de la movilidad urbana
6. ¿Como se garantiza/ó la sostenibilidad del proyecto?

Validación de guía de entrevista

.....

Sr. Brayan Chandi

c.i. 1004160394

TESISTA

.....

Ing. Fabián Cuzme Rodríguez, MSc.

c.i. 1311527012

DOCENTE TUTOR

8.2 ANEXO B: ENTREVISTA EJECUTADA A FUNCIONARIOS MOVIDELNOR E.P



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y REDES DE COMUNICACIÓN

Proyecto tesis: Análisis de desempeño de la tecnología MultiAccess Edge Computing (MEC) bajo comunicación V2X en redes inalámbricas de quinta generación para la actualización de rutas de autobuses de transporte público sobre paradas inteligentes en la ciudad de Ibarra.

Objetivo entrevista: Obtener información relevante mediante entrevista realizada a uno o varios funcionarios de Movidelnor E.P acerca de la operación, características y estado actual del proyecto "Paradas Interactivas" implementado en la ciudad de Ibarra, para realizar un proyecto de investigación dentro del marco Trabajo de Grado.

Guía de entrevista

Nombre del entrevistado: *Jairo Navarrete*Cargo ejercido del entrevistado: *Funcionario 3*Nombre del entrevistador: *Brayan Chandi*Fecha: *01/06/2022*

1. ¿Cuál fue el objetivo general de la implementación del proyecto y que funciones se pretendió ejecutar?

Dar un mejor servicio a la ciudadanía, mostrando las rutas y tiempos para el transporte público, publicidad pagada mediante pantallas interactivas, y seguridad ciudadana por medio de cámaras de video vigilancia.

2. ¿Cuáles son las características del proyecto a nivel operativo?

Puntos de control del transporte público.

3. ¿Qué equipos tecnológicos se utilizaron para montar la infraestructura de las paradas interactivas de transporte público urbano?

Los equipos implementados fueron: switches capa 3, servidores para la gestión de dispositivos, tarjetas electrónicas programables, equipos de conectividad de fibra óptica.

4. ¿Se ha planteado un plan de continuidad del proyecto mediante la integración de nuevos equipos o tecnologías? Si la respuesta es afirmativa, ¿Qué servicios se pretenden brindar?

Si se ingresó un proyecto para la repotenciación del servicio, mediante el streaming de video mediante pantallas en cada una de las paradas.



5. Considera que el proyecto tuvo impacto en el desarrollo de la movilidad urbana

Tuvo un buen impacto al servicio de la ciudadanía, ya que con el trabajo en conjunto con el ECU 912 y el GAD Ibarra implementaron puntos de seguridad en las paradas interactivas.

6. ¿Como se garantiza la sostenibilidad del proyecto?

Mediante el servicio por tarifas para la publicidad pagada en empresas públicas y privadas.

Sr. Brayan Chandi

c.i. 1004160394

ENTREVISTADOR

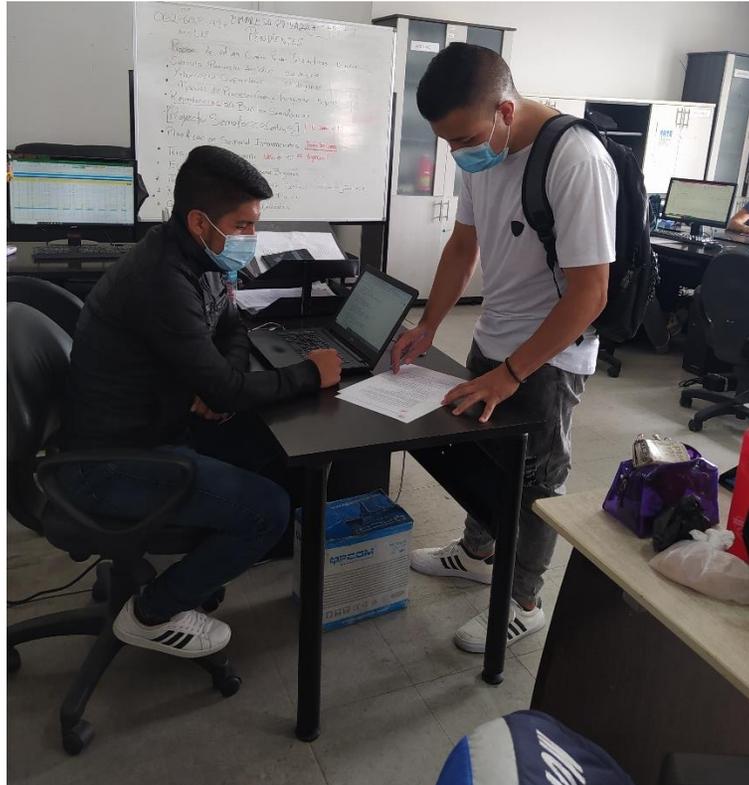
Sr. Jairo Abuarreke

c.i. 1003685482

ENTREVISTADO

Figura 100.

Entrevista realizada a Ing. Jairo Navarrete, funcionario 3 de Departamento de Planificación y Proyectos MOVIDELNOR E.P.



8.3 ANEXO C: ANÁLISIS DE DOCUMENTAL DE ESTUDIOS REFERENCIALES

Objetivo: Identificar criterios clave relevantes acerca de diseño, operación y convergencia de tecnologías de comunicación inalámbrica 5G, procesamiento MEC y conectividad vehicular V2X en entornos Smart para definir la arquitectura de la red planteada en el proyecto de tesis de pregrado descrito.

Tabla 18.

Análisis documental de estudios referenciales sobre tecnologías aplicadas al proyecto

Referencia bibliográfica	Tecnologías involucradas			Tipo de trabajo	Elementos de red	Banda de frecuencia para transmisión	Ancho de banda	Pilares de operación óptima		Extensión de área de pruebas	Resultados
	MEC	V2X	5G					Latencia mínima	Soporte para alto tráfico y alta demanda		

<p>Ma, H., Li, S., Zhang, E., Lv, Z., Hu, J., & Wei, X. (2020). Cooperative autonomous driving oriented MEC-Aided 5G-V2X: Prototype system design, field tests and AI-Based optimization tools. <i>IEEE Access</i>, 8, 54288–54302. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981463</p>	<p>x</p>	<p>x</p>	<p>x</p>	<p>Pruebas de implementación sobre entorno real</p>	<p>RSU, BBU, RRU, antenas gNodeB, CN, UE, MEC Host</p>	<p>3,5 [GHz] - V2V Downlink/ Upkink & V2V Sidelink</p>	<p>80 [MHz] - V2N Downlink/ Uplink. 20 [MHz] V2V Sidelink</p>	<p>1 [ms] logrado aumentando el espaciado entre subportadoras a 60 [kHz] para disminuir el intervalo de tiempo de transmisión</p>	<p>-Para tráfico de movilidad elevado la cobertura de la celda debe ser lo más pequeña posible para reducir la competencia de ancho de banda entre terminales. -Cobertura grande para evitar impacto de trasposos frecuentes. -Solución baja frecuencia y alta potencia (Master eNB) en red heterogénea de macro celdas; y alta</p>	<p>1,3 [Km]</p>	<p>Procesamiento con MEC: -Envío de 20[PPS] de 64 [B] c/u a vehículos. -Comunicación UE y Servidor MEC entre 2,4-3,5 [ms]</p>
---	----------	----------	----------	---	--	--	---	---	---	-----------------	---

								<p>frecuencia y baja potencia (Slave eNB).</p> <p>-Comunicación V2V con frecuencia dedicada.</p> <p>-Implementación de servidor MEC cerca de estaciones base.</p>		
--	--	--	--	--	--	--	--	---	--	--

<p>Arriagada Muñoz, M. A. (2019). <i>DISEÑO DE RED DE TRANSPORTE PARA SERVICIOS MOVILES “5G.”</i> https://repositorio.usm.cl/handle/11673/47266</p>			x	Propuesta de diseño	Estructura OTN, eNodeB, gNodeB	700 [MHz]	Escalable 100 [MHz] hasta 1 [GHz] en función de la capacidad de la infraestructura	< 4 [ms] ante una capacidad de cobertura de 10 [Mbps/m ²] bajo caso de uso eMBB	Se aplica la técnica de superposición de etiquetas, aislar elemento de una red de transporte L2 para facilitar la movilidad de equipos y dispositivos de red L3 sobre L2 a nivel de MAC	No se especifica área de prueba, pero se establece densidad de conexión a 1000000 [equipos/Km ²]	Propuesta de implementación de BH&FH para red 5G
--	--	--	---	---------------------	--------------------------------	-----------	--	---	---	--	--

<p>Abdel Hakeem, S. A., Hady, A. A., & Kim, H. W. (2020). 5G-V2X: standardization, architecture, use cases, network-slicing, and edge-computing. <i>Wireless Networks</i>, 26(8), 6015–6041. https://doi.org/10.1007/s11276-020-02419-8</p>	<p>x</p>	<p>x</p>	<p>x</p>	<p>Estudio teórico de comparativa entre tecnologías V2X actuales</p>	<p>RSU, OBU, eNB, UE</p>	<p>5850 - 5925 [MHz] para comunicaciones V2V o V2I, y banda de frecuencia del espectro de comunicaciones móviles con licencia para comunicaciones V2N</p>	<p>eMBB banda ancha móvil mejorada con espectros entre 800 - 3000 [MHz]</p>	<p>1 - 10 [ms] de acuerdo con 3GPP Release 15</p>	<p>En el caso de la etapa operativa bajo el estándar IEEE 802.11p los escenarios de alta densidad se controlan por Control de Congestión Distribuido - DCC y CSMA-CA</p>	<p>N/E</p>	<p>Criterios de evolución de tecnologías celulares, sobre todo 5G enfatizando en sus características, las cuales son: el manejo de densidad de tráfico creciente, QoS, adaptable a redes heterogéneas para brindar interoperabilidad de diferentes UE</p>
--	----------	----------	----------	--	--------------------------	---	---	---	--	------------	---

<p>Mu, N., Gong, S., Sun, W., & Gan, Q. (2020). The 5G MEC Applications in Smart Manufacturing. <i>Proceedings - 2020 IEEE 13th International Conference on Edge Computing, EDGE 2020</i>, 45–48. https://doi.org/10.1109/EDGE50951.2020.00014</p>	x		x	<p>Implementación pre comercial</p>	<p>CPRI, BBU, UPF, 5GC</p>	<p>2,6 [GHz]</p>	<p>eMBB banda ancha móvil mejorada con espectros entre 800 - 3000 [MHz]</p>	<p><10 [ms] en última milla y 20 [ms] en comunicación de extremo a extremo, con jitter aproximado de 2 [ms]</p>	<p>N/E</p>	<p>Planta de Wuxi (China)</p>	<p>Evidencia de capacidades de 5G MEC para aplicaciones industriales, con enfoque al uso de recursos de módulos que integran la red.</p>
---	---	--	---	-------------------------------------	----------------------------	------------------	---	--	------------	-------------------------------	--

Partes intervinientes:



Sr. Brayan Chandi

c.i. 1004160394

TESISTA



Ing. Fabián Cuzme Rodríguez, MSc.

c.i. 1311527012

DOCENTE TUTOR

8.4 ANEXO D: SCRIPTS *.ned* y *.ini* ESTRUCTURADOS PARA LA DEFINICIÓN DE RED Y OPERACIÓN CONVERGENTE DE EQUIPOS Y DISPOSITIVOS.

La estructura de código usada para la ejecución y obtención de resultados de las diferentes etapas de comunicación mostradas en este documento se encuentran disponibles en el repositorio https://github.com/armandochandi/V2X_MEC_5G.git, debido a que todo el conjunto lógico de algoritmos se considera demasiado extenso para incluirlo de forma explícita y literal en este documento.