



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
GESTIÓN DE BIBLIOTECAS



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, HUILA

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

María Paula Mora, con C.C. No. 1075317385,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o

Titulado ANÁLISIS CALIDAD DE SERVICIO DE VOZ IP presentado y aprobado en el año 2023 como requisito para optar al título de Ingeniera Electrónica;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

María Paula Mora

Firma:

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN DE BIBLIOTECAS					   	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 3

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:

ANÁLISIS DE CALIDAD DE SERVICIO VoIP UTILIZANDO LOS CODECS iLBC Y OPUS EN UN SISTEMA CELULAR V2V DE 5G.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Mora Martínez	María Paula

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Diomedes Bravo	Martín

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERA ELECTRÓNICA

FACULTAD: INGENIERÍA

PROGRAMA O POSGRADO: INGENIERIA ELECTRÓNICA

CIUDAD: NEIVA

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2023

NÚMERO DE PÁGINAS:56

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una **X**):

Diagramas X Fotografías___ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general___ Grabados___
 Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas
 o Cuadros X

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser **LAUREADAS** o **Meritoria**):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:



Español

Inglés

Español

Inglés

- | | | | |
|-------------------------------|-------------------------|----------|-------------------|
| 1. 5G | 5G | 6. ITU-R | ITU-R |
| 2. telefonía celular | Cellular System | 7. 3GPP | 3GPP |
| 3. Ondas milimétricas | Millimeter Waves | 8. V2V | V2V Communication |
| 4. Servicio de Voz | Voice Service | | |
| 5. Protocolos de Comunicación | Communication Protocols | | |

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

En los últimos años, las telecomunicaciones móviles han experimentado cambios significativos. Aunque en muchos lugares aún se está realizando la transición del 3G al 4G, la tecnología 5G está cada vez más cerca y se considera una meta prioritaria. Según la definición de la norma de Telecomunicaciones Móviles Internacionales (IMT) de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), la quinta generación promete una amplia gama de oportunidades tecnológicas que actualmente no son posibles con el 4G. Estas oportunidades incluyen la capacidad de conectar una mayor cantidad de dispositivos en redes más rápidas y confiables, aprovechando la comunicación entre dispositivos (D2D), como celulares y vehículos, sin necesidad de una comunicación directa con la infraestructura de red. Se espera que esto resuelva el problema de la capacidad de la red. Sin embargo, la implementación del 5G en Colombia también plantea grandes desafíos y debe realizarse de manera gradual, conviviendo con las generaciones celulares existentes. En este proyecto de grado, se presenta una investigación que analiza el comportamiento de los códecs iLBC y OPUS en la comunicación vehicular (V2V) utilizando redes 5G. Se utiliza NS3 para modelar un escenario con dos vehículos comunicándose a través de redes 5G. El escenario se repite dos veces con velocidades diferentes para simular entornos distintos, uno similar a las velocidades en carreteras y otro imitando vehículos en movimiento dentro de áreas urbanas. La simulación proporciona datos sobre el porcentaje de pérdidas en cada escenario, los cuales se mapean en los codificadores de voz correspondientes. Luego, se evalúa la calidad del servicio de voz sobre IP (VoIP) utilizando el audio codificado y se generan gráficas para obtener una visión clara de la calidad de voz después de la codificación. Finalmente, se realiza un análisis detallado y se obtienen recomendaciones sobre los códecs de última generación de código abierto para el estudio del plan de desarrollo del 5G en la región.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Mobile telecommunications have experienced significant changes in recent years, and the imminent arrival of 5G technology promises a range of technological opportunities that are currently unachievable with 4G. However, the implementation of 5G in the country poses challenges and requires a gradual process alongside the existing cellular generations. This degree project focuses on investigating the behavior of the



ILBC and OPUS codecs in V2V communication using 5G networks.

The research begins with a simulation in NS3, modeling a scenario where two vehicles communicate using 5G networks. The simulation is conducted twice with varying speeds to create different environments. The resulting frames provide insight into the percentage of losses in each scenario, which are then mapped to different encoders.

The project also involves evaluating the quality of audio through the PESQ evaluator. The audio, recorded with good quality, is passed through the encoders with the previously obtained loss percentage. The encoded audio is then evaluated, and graphs are generated to assess the voice quality after coding.

Finally, a detailed analysis is conducted, and recommendations are made regarding the latest generation of open-source codecs for the study of the 5G development plan in the region. The project aims to contribute to the understanding of 5G technology and its impact on V2V communication, ultimately informing the implementation of 5G in the country's telecommunications infrastructure.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: JESÚS DAVID QUINTERO POLANCO

Firma:

Nombre Jurado: JOHAN JULIÁN MOLINA MOSQUERA

Firma:

ANÁLISIS DE CALIDAD DE SERVICIO VoIP UTILIZANDO LOS CODECS iLBC Y
OPUS EN UN SISTEMA CELULAR V2V DE 5G.

MARÍA PAULA MORA MARTÍNEZ

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
NEIVA - HUILA
2022

ANÁLISIS DE CALIDAD DE SERVICIO VoIP UTILIZANDO LOS CODECS iLBC, Y
OPUS EN UN SISTEMA CELULAR V2V DE 5G

MARIA PAULA MORA MATÍNEZ

Trabajo de Grado Para Optar al Título de Ingeniero Electrónico

Director

Martín Diomedes Bravo

Ing. Electrónico

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

NEIVA - HUILA

2022

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Neiva, 29 de Julio de 2022

DEDICATORIA

El presente trabajo de grado está dedicado a mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida. A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa y que me ayudaron a crecer tanto personal como profesionalmente.

María Paula Mora Martínez

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero electrónico Martín Diomedes quien me aconsejó y marcó el camino para desarrollar y culminar este proyecto de la mejor manera posible.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Surcolombiana y a todos los docentes quienes me inspiraron y se encargaron de despertar en mí la curiosidad y el deseo por aprender cada día más.

Finalmente, a mis padres, mi hermana, familiares, amigos y a todas aquellas personas que me apoyaron y en algún momento me dieron su voz de aliento cuando más lo necesitaba.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	17
2. OBJETIVOS.....	19
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3. MARCO TEÓRICO.....	20
3.1. COMUNICACIONES MÓVILES	20
3.2. EVOLUCIÓN DE LAS COMUNICACIONES MÓVILES.....	21
3.3. COMUNICACIÓN 5G.....	27
3.4. SIMULADOR NS-3 Y MODULO MILICAR	29
3.5. SERVICIO DE VOZ IP.....	32
3.6. CODIFICADORES DE AUDIO.....	32
3.7. CALIDAD DE SERVICIO (QoS).....	35
3 SIMULACIÓN DE COMUNICACIÓN 5G EN UN SISTEMA CELULAR V2V	40
4 CODIFICACIÓN Y DECODIFICACIÓN	46
5 CONCLUSIONES.....	51
6 RECOMENDACIONES.....	53
7 REFERENCIAS	54
8 ANEXOS.....	62

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Diagrama de un sistema celular	21
Figura 2 Evolución de generaciones móviles.....	26
Figura 3 Espectro 4G vs Espectro 5G.....	28
Figura 4 Traducción factor R a escala MOS	38
Figura 5 Obtención de la calidad mediante el modelo PESQ	39
Figura 6 Diagrama de Flujo de la aplicación	40
Figura 7 Representación gráfica de la simulación	41
Figura 8 Escenarios simulados	42
Figura 9 Pérdidas con velocidad de 79.2 km/h.....	43
Figura 10 Pérdidas con velocidad de 118.8 km/h.....	44
Figura 11 Instante de Recepción vs Bytes Leídos para velocidad de 79.2 km/h	45
Figura 12 Instante de Recepción vs Bytes Leídos para velocidad de 118.8 km/h	46
Figura 13 Evaluación PESQ	49
Figura 14 Evaluación Subjetiva	50

RESUMEN

Las telecomunicaciones móviles han desarrollado grandes cambios en los últimos años, y aunque en muchos lugares del país aún se está dando la transición de 3G a 4G, la tecnología 5G se escucha cada vez más cerca y es algo a lo que se quiere llegar cuanto antes, pues según la definición de la norma de Telecomunicaciones Móviles Internacionales (IMT), de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), la quinta generación promete un abanico de oportunidades tecnológicas que hoy no son realizables con 4G, como conectar una mayor cantidad de dispositivos en redes más rápidas y confiables, haciendo uso de la comunicación entre dispositivos (D2D), los cuales pueden ser celulares o vehículos, en donde a menudo no es necesario la comunicación directa con la infraestructura de red, por lo que se espera que con esto se resuelva el problema de la capacidad de red. Sin embargo, la llegada de 5G a Colombia también representa grandes retos y es un proceso que se debe dar por etapas mientras conviven con las generaciones celulares ya implantadas; por esto en este proyecto de grado se presenta un trabajo de investigación en donde se analiza el comportamiento de los códecs iLBC y OPUS sobre la comunicación vehicular (V2V) haciendo uso de las redes 5G.

Para esto en primer lugar se utilizó NS3, en donde se modeló un escenario con dos vehículos que van a una misma velocidad, comunicándose entre sí usando redes 5G, estos se acercan, se cruzan y luego se alejan; este escenario se realiza dos veces, con velocidades distintas con el fin de crear dos ambientes diferentes, el primero con una mayor velocidad similar a la que llevan los vehículos en carreteras fuera de la ciudad, y otro con menor velocidad imitando a dos vehículos que están en movimiento dentro del casco urbano. Esta simulación arroja unas tramas que permiten obtener el porcentaje de pérdidas que se puede presentar en cada escenario, para posteriormente mapear dichas pérdidas en los diferentes codificadores de voz.

Seguido a esto se realiza una evaluación de la calidad del servicio de VoIP. Se pasa el audio por los codificadores de voz con el porcentaje de pérdida que se obtuvo en el escenario definido anteriormente y el audio codificado, se pasa por el evaluador PESQ y se generan las gráficas que permiten tener una visión más clara de la calidad de voz que se obtuvo después de la codificación. Finalmente se realiza un análisis detallado y se obtienen recomendaciones sobre los códecs OPEN SOURCE de última generación, para el estudio del plan de desarrollo de 5G en la región.

PALABRAS CLAVE

5G, telefonía celular, Ondas milimétricas, Servicio de Voz, Protocolos de Comunicación, ITU-R, 3GPP, V2V

ABSTRACT

Mobile telecommunications have undergone great changes in recent years, and although the transition from 3G to 4G is still taking place in many parts of the country, 5G technology is becoming closer and closer and it is something that we want to make a reality as soon as possible, because As defined by the IMT-2020 standard, from the International Telecommunications Union, ITU, the fifth generation promises a range of technological opportunities that today are not achievable with 4G, from full connectivity and autonomous vehicles to the Internet of Things. However, the arrival of 5G in our country also represents great challenges and it is a process that must take place gradually while two past generations also coexist; For this reason, in this degree project, the development of an investigation is presented where the behavior of the iLBC and OPUS codecs on V2V communication using 5G networks is analyzed.

For this, in the first place, a simulation is carried out in NS3, which allows modeling a scenario where two vehicles that go at the same speed, communicate with each other using 5G networks, approach, cross and then move away, this scenario is performed twice, with different speeds in order to create two different environments, the first with a higher speed similar to that of vehicles on roads outside the city, and the other with a lower speed imitating two vehicles that are moving inside from the urban area. This simulation yields some frames that allow obtaining the percentage of losses that can occur in each scenario, to later map said losses in the different encoders.

Following this, good quality audio is recorded using Audacity, and passed through the PESQ evaluator to ensure a good grade before it goes through the encoding process.

Next, the audio is passed through the encoders with the loss percentage that was obtained previously, and the encoded audio is passed through the PESQ evaluator and the graphs are generated that allow a clearer vision of the voice quality that was obtained later. of coding, to finally carry out a detailed analysis and obtain recommendations on the latest generation OPEN-SOURCE codecs, for the study of the 5G development plan in the region.

KEYWORDS:

Mobile Communications, Millimeter Waves, Voice Service, Communication Protocols, Open Source, ITU-R, 3GPP, Cellular System, V2V Communication

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia la comunicación siempre ha jugado un papel importante en todos los ámbitos de la sociedad, sin embargo, a medida que las civilizaciones crecían territorialmente se veía la necesidad de evolucionar cada vez más las herramientas y métodos de comunicación hasta llegar a las comunicaciones de redes móviles, las cuales permiten que dos usuarios haciendo uso de un teléfono móvil se comuniquen de manera remota a través del aire por medio de ondas de radio. Con el transcurso del tiempo estas también evolucionan originando así las generaciones de redes móviles (1G,2G,3G,4G) que proporcionan las mejoras de rendimiento requeridas en ese momento de la historia.

En la última década el incremento de equipos inalámbricos que manejan los usuarios, tales como teléfonos inteligentes, tabletas, computadores portátiles, entre otros, ha llevado a un aumento en la demanda y tráfico de datos, lo cual ha generado la necesidad de llevar a cabo una nueva generación de redes móviles, conocida como 5G, que espera conectar personas, cosas, datos, aplicaciones, sistemas de transporte y ciudades en entornos de redes de comunicaciones inteligentes todo esto con una rapidez considerable y de manera segura. Para esto la ITU ha establecido un conjunto de normas conocido como Proyecto Asociación de Tercera Generación (3GPP) que cumplen los requerimientos necesarios para llevar a cabo estos nuevos retos¹.

En Colombia la transición entre las redes 4G y 5G implica una dinámica distinta a la realizada con las generaciones anteriores, pues en estas las comunicaciones móviles son diseñadas para la comunicación humano-humano (HTC), es decir, en ambos extremos se involucra la acción humana, desde la iniciación, interpretación del mensaje y la finalización de la llamada, sin embargo las nuevas generaciones están diseñadas para permitir una comunicación HTC y una comunicación entre objetos (IoT), transformando por completo el antiguo paradigma de comunicación, cambiando requerimientos como la red de soporte y el uso de la interfaz de aire, pues la tecnología 5G pretende dedicar frecuencias de bandas distantes entre sí, considerando frecuencias de ondas milimétricas².

Por otro lado, se espera que en Colombia las conexiones 4G continúen creciendo y no serán reemplazadas del todo por conexiones 5G en corto tiempo, por lo que esta nueva

¹ 3GPP 5G Formally Endorsed as ITU IMT-2020 5G Standard [Anónimo]. Huawei [página web]. (4, julio, 2020). [Consultado el 10, febrero, 2022]. Disponible en Internet: <<https://www.huawei.com/en/news/2020/7/3gpp-itu-imt-2020-5g-standard>>.

² MINISTERIO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES. Plan tic 2018-2022 [en línea]. Bogotá: MinTIC, 2018 [consultado el 22, febrero, 2020]. 107 p. Disponible en Internet: <https://micrositios.mintic.gov.co/plan_tic_2018_2022/pdf/plan_tic_2018_2022_20191121.pdf>.

tecnología tendrá un rol complementario y por tanto deberá ser compatible con la anterior generación de red celular.

Teniendo en cuenta lo anterior este proyecto se desarrolla con la finalidad de profundizar y aplicar los conocimientos de comunicaciones móviles adquiridos a lo largo del plan de estudios del programa, analizando la influencia que tienen los codificadores de voz iLBC y OPUS sobre la comunicación V2V haciendo uso de las redes 5G, poniendo en práctica la temática vista en conmutación sobre la evaluación de servicios, con el propósito de generar bases y recomendaciones sobre los codificadores de voz OPEN SOURCE de última generación, para el estudio del plan de desarrollo de 5G en la región y así promover el crecimiento tecnológico que permite mejorar la calidad de vida de la población mediante el servicio de comunicación de VoIP.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar el rendimiento de los codificadores iLBC y OPUS en sistemas de comunicación celular V2V de 5G.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el estado del arte de los codificadores utilizados para VoIP.
- Comprender el funcionamiento y notación de NS3 para trabajar con el módulo millicar.
- Definir los escenarios del sistema celular V2V a implementar en NS-3 para validar el servicio de VoIP.
- Obtener resultados de evaluación de servicios de VoIP con los codificadores iLBC y OPUS tanto objetiva como subjetivamente.
- Analizar los resultados obtenidos y generar recomendaciones en su uso.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. COMUNICACIONES MÓVILES

Las comunicaciones móviles son un subconjunto de las radiocomunicaciones y siguen el principio general de la telefonía, en donde un operador responsable de la gestión del servicio suministra un equipo de red que permite conectar dos usuarios remotos.

Por otro lado, el reglamento de la UIT define el servicio móvil como un servicio de radiocomunicaciones entre estaciones móviles y estaciones fijas, o entre estaciones móviles únicamente.

Teniendo en cuenta lo anterior se puede concluir que un servicio de comunicaciones móviles es todo aquel servicio que tenga al menos un terminal cuya ubicación se desplaza, en donde se requiere un servicio durante ese desplazamiento.

Al tener una o más terminales con ubicación variable este sistema conecta a los usuarios a través de ondas radioeléctricas, es decir, para esta comunicación no son necesarios los pares de cobre ni fibra óptica, y las transmisiones de radio constituyen el enlace final.

Por lo tanto, el usuario móvil se comunica a través del aire con una antena (estación de radio), que a su vez se enlaza con la central del operador, la cual encamina la comunicación hacia la parte correspondiente en la red fija o a través de otras antenas, por esta razón es necesario que el usuario móvil se encuentre dentro del área de alcance de la antena, que tiene una forma hexagonal y se le conoce con el nombre de celda (de ahí el nombre red celular), de lo contrario si el usuario se encuentra fuera de la celda la comunicación no podrá ser efectiva.

Con el fin de tener una comunicación efectiva el sistema celular se forma dividiendo un territorio en áreas pequeñas hexagonales correspondientes a las celdas en donde cada una contiene una antena con el fin de eliminar los huecos entre ellas e impedir que se pierda la localización de los usuarios, es decir que estos se encuentren fuera de una de estas celdas. A su vez las celdas se agrupan en clústeres o racimos, de forma que el

espectro de frecuencias se pueda utilizar en cada celda nueva, evitando así las interferencias³⁴⁵.

Figura 1 Diagrama de un sistema celular



Fuente: Sin autor. [imagen] Redes Móviles [Consultado: 7 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://redesemergentesics.wordpress.com/unidad-iii/>

3.2. EVOLUCIÓN DE LAS COMUNICACIONES MÓVILES

Debido a los cambios que se dan en la sociedad a lo largo de los años, la red de comunicación móvil evoluciona generando así nuevas generaciones (1G,2G,3G,4G), que traen consigo cambios en los estándares, velocidades, tecnología y frecuencia, que permiten suplir las necesidades de la época y mejorar cada vez más el servicio prestado a los usuarios.

A continuación, se describen las principales características de cada una de ellas:

- Primera Generación (1G):

³ Anzola, M. F. (06 de 01 de 2021). Del 1G al 5G: la evolución de las redes móviles tras el cambio de generación. Recuperado el 2 de 10 de 2022, de <http://asiet.lat/magazine-digital/del-1g-al-5g-la-evolucion-de-las-redes-moviles-tras-el-cambio-de-generacion/>

⁴ ¿CÓMO FUNCIONA una red móvil? - Las ondas [Anónimo]. Las ondas [página web]. [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://radio-waves.orange.com/es/como-functiona-una-red-movil/>>.

⁵ TELECOMUNICACIONES [Anónimo]. Informática Aplicada a las Ciencias Sociales. Telecomunicaciones. Rafael Barzanallana. UMU [página web]. [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://www.um.es/docencia/barzana/IACSSS/Telecomunicaciones.html>>.

Esta generación empieza en el mundo en los 80's, Colombia lo hace en los 90's, se basaba en un conjunto de celdas o células interconectadas, brindando servicio a los usuarios que estaban dentro de esta zona de cobertura, utilizaba canales analógicos, es decir, solo permitía llamadas de voz, en donde la calidad no era muy buena, ya que la capacidad de transmitir datos era baja (del orden de los Kilo bits por segundo), y tenía muy baja seguridad en las comunicaciones, por otro lado, no todas las redes eran basadas en los mismos protocolos y dependían bastante de los fabricantes lo cual dificultando la conexión entre los terminales:

Tabla 1

Descripción de las características presentes en la Primera generación de redes móviles.

Tecnología	Analógica
Velocidad	1kbps a 2,4 kbps
Ancho de banda	30 kHz
Multiplexación	FDMA
Conmutación	conmutación de circuitos
Estándares	Sistema Telefónico Móvil Avanzado (AMPS)
Frecuencia	800- 900 MHz
Servicios	Voz
Core Network	Red telefónica conmutada (PSTN)

- Segunda Generación (2G):

Empieza en el mundo en los 90's, Colombia hizo la transición a fines de esa misma década. En esta generación se mejoró la seguridad de las comunicaciones ya que se empiezan a utilizar protocolos digitales cifrados, se estandarizan los protocolos de comunicación con el fin de facilitar la interconexión de las redes y la posibilidad de conectarse a ellas con un mismo terminal, apareciendo el primer concepto de roaming y los mensajes de texto:

Tabla 2

Descripción de las características presentes en la Segunda generación de redes móviles.

Tecnología	Digital
Velocidad	14kbps a 64 Kbps
Ancho de banda	Sistema global para las comunicaciones móviles (GSM) divide cada canal de 200 kHz en bloques de 25 kHz. Acceso múltiple por división de código (CDMA) es nominalmente de 1,23 MHz
Multiplexación	Acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) y CDMA.
Conmutación	Conmutación de circuitos
Estándares	GSM, CDMA, Celular Digital Japonés (JDC).
Banda de frecuencia	GSM: 850 - 1900 MHz CDMA: 825 - 849 MHz
Servicios	Voz Digital, Mensajes de texto (SMS), roaming internacional, conferencia, llamada en espera, retención de llamada, transferencia de llamadas, bloqueo de llamadas, número de identificación de llamadas, grupos cerrados de usuarios (CUG), Servicio Suplementario de Datos no Estructurado (USSD), autenticación, facturación basada en los servicios prestados a sus clientes, por ejemplo, cargos basados en llamadas locales, llamadas de larga distancia, llamadas con descuento, en tiempo real de facturación.

- Tercera Generación (3G):

Aparece en el año 2000 en Colombia, mejorando la potencia de las antenas, aumentando el número de conexiones, la calidad de voz y la velocidad de transmisión de datos, lo que permitió la aparición de las primeras aplicaciones (APPS) de audio, imágenes o vídeo y el servicio de video llamada:

Tabla 3
Descripción de las características presentes en la Tercera generación de redes móviles.

Velocidad	384KBPS 2Mbps
Ancho de banda	de 5 a 20 MHz
Interfaz de radio	Acceso múltiple por división de código de banda ancha (WCDMA)
Servicios	Telefonía móvil de voz, acceso a Internet de alta velocidad, acceso fijo inalámbrico a Internet, llamadas de video, chat y conferencias, televisión móvil, vídeo a la carta, servicios basados en la localización, telemedicina, navegación por Internet, correo electrónico, buscapersonas, fax y mapas de navegación, juegos, música móvil, servicios multimedia, como fotos digitales y películas. servicios localizados para acceder a las actualizaciones de tráfico y clima, servicios móviles de oficina, como la banca virtual.

- Cuarta generación (4G):

En el año 2013 se empieza a ofrecer de forma masiva en Colombia hasta la actualidad, mientras sigue el despegue y despliegue del 5G, está basado totalmente en IP que permite soportar servicios multimedia (en especial video

aplicaciones y servicios: YouTube, video llamadas etc.) y cubre las necesidades de consumo de más contenido y mayor calidad⁶⁷⁸⁹¹⁰.

Tabla 4

Descripción de las características presentes en la Cuarta generación de redes móviles.

Velocidad	100 Mbps en movimiento y 1 Gbps cuando se permanece inmóvil.
Ancho de Banda	5-20 MHz, opcionalmente hasta 40 MHz
Estándares	Long-Term Evolution (LTE) Time-Division Duplex (TDD y LTE-FDD) estándar WiMAX
Bandas de frecuencia	LTE cubre una gama de diferentes bandas. En América del Norte se utilizan 700, 750, 800, 850, 1900,

⁶ Evolución la red de comunicación móvil, del 1G al 5G [Anónimo]. VIU [página web]. [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://www.universidadviu.com/int/actualidad/nuestros-expertos/evolucion-de-la-red-de-comunicacion-movil-del-1g-al-5g>>.

⁷ TELECOMUNICACIONES [Anónimo]. Informática Aplicada a las Ciencias Sociales. Telecomunicaciones. Rafael Barzanallana. UMU [página web]. [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://www.um.es/docencia/barzana/IACCSS/Telecomunicaciones.html>>.

⁸ GIRAO, David. Diferencias entre el 3G, 4G y 5G en los móviles. Evolución y futuro. MovilZona [página web]. (28, agosto, 2020). [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://www.movilzona.es/2020/08/28/diferencias-redes-3g-4g-5g-evolucion-futuro/>>.

⁹ ANZOLA, Miguel Felipe. Del 1G al 5G: la evolución de las redes móviles tras el cambio de generación | DPL News. DPL News [página web]. (3, agosto, 2020). [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://dplnews.com/del-1g-al-5g-la-evolucion-de-las-redes-moviles-tras-el-cambio-de-generacion/>>.

¹⁰ PLOKIKO. Del 1G al 5G: así funcionan las redes móviles y todo lo que cambia tras cada salto de generación. Xataka Móvil - Teléfonos móviles, tarifas, operadores de telefonía [página web]. (13, abril, 2020). [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://www.xatakamovil.com/conectividad/1g-al-5g-asi-funcionan-redes-moviles-todo-que-cambia-cada-salto-generacion>>.

1700/2100 (AWS), 2300 (WCS) 2500 y 2600 MHz (bandas 2, 4, 5, 7, 12, 13, 17, 25, 26, 30, 41); 2500 MHz en América del Sur; 700, 800, 900, 1800, 2600 MHz en Europa (bandas 3, 7, 20); 800, 1800 y 2600 MHz en Asia (bandas 1, 3, 5, 7, 8, 11, 13, 40) 1800 MHz y 2300 MHz en Australia y Nueva Zelanda (bandas 3, 40).

Servicios

Acceso móvil web, telefonía IP, servicios de juegos, TV móvil de alta definición, videoconferencia, televisión 3D, computación en la nube, gestión de flujos múltiples de difusión y movimientos rápidos de teléfonos móviles, Digital Video Broadcasting (DVB), acceso a información dinámica, dispositivos portátiles.

Figura 2 Evolución de generaciones móviles



Fuente: Soto, Marvin G. [imagen]. Tecnologías de comunicación móvil de quinta generación (5G). [Consultado: 7 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://marvin->

soto.medium.com/tecnolog%C3%ADas-de-comunicaci%C3%B3n-m%C3%B3vil-de-quinta-generaci%C3%B3n-5g-cae5fc10d2e

3.3. COMUNICACIÓN 5G

El primer uso móvil de la tecnología 5G se diseña para funcionar en modo No Autónomo (NSA) para respaldar el caso de uso de banda ancha móvil mejorado (eMBB). En el modo NSA, la conexión se ancla en la tecnología Long Term Evolution (LTE) (tecnología 4G 3GPP) con portadoras 5G NR utilizadas para aumentar la velocidad de datos y reducir la latencia.

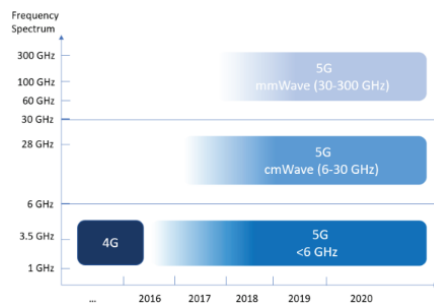
A menudo se refiere a 5G como la próxima generación de tecnología de comunicaciones móviles, pero su potencial es más significativo que esto. 5G probablemente se convierta en el futuro de las comunicaciones, respaldando el acceso fijo y móvil. Además de eMBB, 5G admitirá Comunicaciones Ultraconfiables y de Baja Latencia (URLLC), también conocidas como Comunicaciones Críticas de Misión, y Comunicaciones Masivas de Tipo Máquina (mMTC) - una evolución de IoT - junto con la Convergencia Fija y Móvil. Aunque los diversos requisitos de eMBB, URLLC y mMTC no se admitirán desde el primer día, ha sido necesario un enfoque flexible en el diseño de NR para garantizar que los estándares 5G evolucionen para satisfacer todos los requisitos. Este enfoque ha dado como resultado un diseño NR con numerología escalable (la numerología se refiere a la parametrización de la forma de onda, por ejemplo, el prefijo cíclico y el espaciado de subportadora en la multiplexación de división ortogonal de frecuencia (OFDM)), multiplexación de numerología e implementación de Duplexación por División de Tiempo (TDD). TDD es más adecuado para servicios centrados en datos en los que la conexión descendente (la conexión de la red al usuario) llevará significativamente más tráfico de datos que la conexión ascendente (la conexión del usuario a la red) en la gran mayoría de los casos. TDD será la implementación más común en la mayoría de las bandas de frecuencia iniciales de 5G, aunque cabe destacar que también se admite la operación de Duplexación por División de Frecuencia (FDD).

La versión de 5G NR de diciembre de 2017 no incluye una red de núcleo de próxima generación 5G (NGC) sino que se basa en una evolución del núcleo de paquetes evolucionado 4G existente (EPC), a menudo denominado EPC+. Esto significa que un dispositivo capaz de 5G estará conectado a una radio 4G Release 15 mejorada de 3GPP para el plano de control y una radio 4G y/o 5G para el flujo de tráfico del plano de usuario.

Actualmente el espectro utilizado para la comunicación móvil se encuentra principalmente por debajo de los 6 GHz. En particular, las bandas de frecuencia utilizadas por los sistemas de comunicación 4G se ubican entre 700 MHz y 3 GHz, utilizando tanto el Duplex por División de Tiempo (TDD) como el Duplex por División de Frecuencia (FDD). La implementación del 5G diseñada para utilizar espectro por debajo de 6 GHz incluye las bandas 4G de 700 MHz y 800 MHz. Estas bandas desempeñan un papel importante en la cobertura en interiores y de amplia área para el 5G y se prevé que soporten los servicios de Internet de las cosas (IoT) y cubran áreas urbanas y rurales. El espectro por encima de 6 GHz se está considerando actualmente para el uso del 5G en

el futuro cercano, desde los 6 GHz hasta los 100 GHz, como las ondas cm y mm. Estas bandas no se utilizan actualmente para la comunicación móvil y, por lo tanto, representan un gran potencial para garantizar los valores de rendimiento objetivo del 5G.

Figura 3 Espectro 4G vs Espectro 5G.



Fuente: Barb, G., & Otesteanu, M. [imagen]. 4G/5G: A Comparative Study and Overview on What to Expect from 5G. [Consultado: 14 de febrero de 2023].

La arquitectura LTE se divide en tres partes principales: la red de acceso de radio, la red central y la red de servicios. El UE se comunica con la estación base evolucionada (eNodeB) a través de la red de acceso de radio, E-UTRAN. El EPC consta de cinco componentes principales: MME, S-GW, P-GW, PCRF y HSS. Para 5G, se han definido dos soluciones para la arquitectura: la arquitectura no autónoma (NSA) y la arquitectura autónoma (SA).

Por otro lado, el modelo de protocolo RAN se utiliza para discutir la división funcional en la 5G, que consiste en una unidad distribuida (DU) y una unidad centralizada (CU) dentro de la estación base de radio de próxima generación (gNB). La división funcional ocurre en la capa de PDCP, donde todo lo que está por encima de esta capa reside en la unidad centralizada, y todo lo que está por debajo reside en la unidad distribuida. La interfaz entre la CU y DU se llama F1 y se apoya en una capa de red de transporte IP que se transporta sobre una red de Ethernet del transportista subyacente. No hay requisitos precisos de latencia en la interfaz F1, aunque es probable que las limitaciones de latencia aplicadas se deriven de la latencia del servicio objetivo. La tasa de datos requerida para la interfaz F1 es muy similar a la de los enlaces de backhaul LTE.

La división funcional del RAN también afectará la relación entre la unidad de banda base (BBU) y la unidad de radio remota (RRU). 5G también incluirá sistemas de antena de gran tamaño que integrarán la funcionalidad de RRU dentro de la unidad de antena, conocida como unidades de antena activa (AAU). La interfaz entre la DU y la AAU se llama F2 y podría ser local o remota. La interfaz entre la BBU y la RRU se basa en el protocolo de interfaz de radio público común (CPRI), mientras que una nueva alternativa de este protocolo conocida como eCPRI se está desarrollando para implementaciones de 5G. Se espera que ambas interfaces estén disponibles entre DU y AAU en la 5G.

Finalmente, con el desarrollo de 5G, los valores clave de rendimiento son extremadamente altos y se proponen tres principales casos de uso:

- Banda Ancha Móvil Mejorada (eMBB) - también conocida como Banda Ancha Móvil Extrema - que proporcionará velocidades más rápidas, muchos más dispositivos conectados, una experiencia mejorada en general y realidad virtual y aumentada;
- Comunicación Ultraconfiable y Baja Latencia (URLLC), que permitirá la automatización de fábricas, la entrega de drones, redes inteligentes y monitoreo autónomo;
- Comunicación Masiva de Tipo Máquina (mMTC), que actuará en el sector de la salud electrónica, sensores inteligentes, transporte y logística inteligentes y redes de energía inteligentes¹¹¹².

3.4. SIMULADOR NS-3 Y MODULO MILLICAR

Ns-3 es un software gratuito que permite simular una red de eventos discretos para sistemas de internet utilizando el lenguaje de programación C++, se desarrolló con el fin de facilitar el estudio y la investigación de estos sistemas de una manera fácil y gratuita, cuenta con una licencia publica general (GNU GPLv2) y es mantenido por una comunidad mundial.

Por otro lado, NS-3 cuenta con una variedad de módulos que permiten simular distintos escenarios de comunicación con solo especificar ciertos parámetros, uno de ellos es el módulo Millicar, el cual proporciona un escenario V2V con redes de ondas milimétricas (mmWave), basándose en el estándar 3GPP para sistemas vehiculares de próxima generación. Este módulo también es de código abierto, lo que ayuda a los investigadores a modificar y comparar posibles opciones de diseño y su rendimiento relativo, a través de un enfoque de pila completa de extremo a extremo.

- Modelado del canal en Millicar:

MilliCar se basa en los modelos de propagación y desvanecimiento que sugiere el 3GPP para V2V comunicaciones en mmWaves, haciendo uso de las Interfaces de programación de aplicaciones (API) proporcionadas por el módulo ns-3 Spectrum.

En particular, los dispositivos que se comunican a través del mismo canal inalámbrico están conectados a una sola instancia de SpectrumChannel que da cuenta del

¹¹ Barb, G., & Ottesteanu, M., "4G/5G: A Comparative Study and Overview on What to Expect from 5G," 2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Milan, Italy, 2020, pp. 37-40, doi: 10.1109/TSP49548.2020.9163402.

¹² Sutton, A. (2018). 5G NETWORK ARCHITECTURE. *THE JOURNAL TJ*, 12(1), 9-15.

modelado de los fenómenos de propagación utilizando las interfaces `PropagationLossModel` y `SpectrumPropagationLossModel`.

También se ha implementado la pérdida de paquetes en `MmWaveVehicularPropagationLossModel`, basada en `PropagationLossModel`, pero teniendo en cuenta el modelo definido por [26].

- Capa Física:

Esta capa se compone de dos clases:

MmWaveSidelinkSpectrumPhy: Es una extensión de la clase `SpectrumPhy`, se encarga de la generación periódica de la información del estado del canal (CSI) informada a las capas superiores y actúa como interfaz entre `MmWaveVehicularNetDevice` y el `SpectrumChannel`.

El `SpectrumChannel` se encarga de la transmisión y operaciones de recepción a través de los métodos `StartTxDataFrames` y `StartRx`, en donde `StartTxDataFrames` genera la señal a transmitir por el canal, representada por la estructura `MmWaveSidelinkSpectrumSignalParameters`. Luego, reenvía a la instancia de `SpectrumChannel` llamando al método `SpectrumChannel::StartTx`. Por el contrario, cuando se recibe una señal del `SpectrumChannel`, el método `StartRx` comprueba si se puede o no decodificar aplicando un modelo de error y, de ser así, lo reenvía a la capa superior.

MmWaveSidelinkPhy: se encarga de mantener la sincronización del sistema, y de la gestión del canal físico utilizado para la transmisión y recepción de los bloques de transporte. La estructura de trama utilizada por MilliCar cumple con las especificaciones de la nueva radio (NR) es decir, una trama de 10 ms es dividido en 10 subtramas, cada una de las cuales contiene un número variable de ranuras. Cada ranura está compuesta por 14 símbolos de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), cuya duración depende de la seleccionada. El módulo actualmente soporta numerologías NR 2 y 3, es decir, con 4 y 8 slots por subtrama, respectivamente, correspondientes a espaciado entre subportadoras (SCS) de 60 kHz o 120 kHz. Se utiliza un búfer de transmisión para almacenar los bloques de transporte que se enviarán durante el primer slot disponible, junto con información sobre el esquema de modulación y codificación (MCS) a utilizar y el símbolo OFDM asignados. El método `StartSlot` marca el inicio de cada slot y se encarga de transmitir los bloques de transporte almacenados en el búfer.

- Capa de Control de Acceso Medio (MAC):

Las funcionalidades de la capa MAC se implementan en la clase `MmWaveSidelinkMac`, que incluye:

- (i) La gestión del acceso al medio

- (ii) La programación de los recursos disponibles
- (iii) El soporte de transmisión y recepción a través de múltiples canales lógicos.
- (iv) La adecuación del enlace.

MmWaveSidelinkMac admite un acceso múltiple por división de tiempo esquema de acceso basado en TDMA, donde diferentes vehículos transmiten en diferentes ranuras. Al comienzo de cada ranura, la capa MAC recupera el patrón de programación y ejecuta DoSlotIndication para decidir si realiza la operación de transmisión o recepción. En caso de que el intervalo esté destinado a la transmisión, el método ScheduleResources divide los recursos disponibles entre los canales lógicos activos y notifica la decisión de programación a las capas superiores. Entonces, se construye el bloque de transporte utilizando las Unidades de datos de servicio (SDU) recibidas desde las capas superiores, que luego se envía a la capa física (PHY) llamando al método AddTransportBlock. Para evitar la asignación de recursos innecesarios, los búferes en las capas superiores son monitoreados a través de un procedimiento periódico de reporte del estado del búfer. Los informes se utilizan para decidir la cantidad de recursos que se reservarán para cada canal lógico. Por el contrario, si la ranura está dedicada a otro dispositivo, la capa PHY es informada sobre una posible recepción entrante por parte del MAC, que luego realiza operaciones de demultiplexación para mapear los paquetes recibidos en los canales lógicos apropiados. Además, se proporcionan funcionalidades de adaptación automática de enlaces basado en informes CSI recibidos del PHY. Este mecanismo es manejado por la clase MmWaveAmc, que usa el último CSI recibido informe para determinar el esquema óptimo de modulación y codificación para ser utilizado en la transmisión.

- Integración con las capas superiores:

Este módulo proporciona una integración con las capas superiores de la pila de protocolos asegurando, una alta flexibilidad para las futuras mejoras en el diseño de la pila. Esto se adjunta a cada instancia de MmWaveSidelinkMac, que luego se vincula a un objeto que se define como LtePdcP. Cerrando la brecha, entre las clases específicas se implementa el Protocolo de Anuncio de Sesión (SAP) para conectar el objeto LtePdcP a nuestro MmWaveVehicularNetDevice, visualizando de esta manera un completo bottom-up e integración de arriba hacia abajo. Las instancias de estas capas para cada conexión de extremo a extremo se gestionan dentro de la clase MmWaveVehicularNetDevice, que amplía NetDevice e implementa todas las clases virtuales comúnmente utilizadas para establecer la comunicación hacia y desde la pila TCP/IP.

-Ayudantes:

El principal ayudante es MmWaveVehicularHelper, cual realiza las siguientes funciones¹³:

- (i) crea y configura los objetos para el cómputo del canal.
- (ii) calcula los parámetros para la estructura del marco, de acuerdo con la numerología 3GPP seleccionada
- (iii) instala la pila de red en los vehículos
- (iv) conecta grupos de vehículos que se comunicarán entre sí.

3.5. SERVICIO DE VOZ IP

VoIP es el acrónimo de Voice over Internet Protocol, como su nombre lo indica es un protocolo que permite la transmisión de voz a través de una conexión de internet.

Al realizar una llamada VoIP, la señal de la voz (analógica), se convierte en paquetes de datos, por medio de los codificadores de audio, estos viajan de un extremo a otro de forma independiente, al llegar al destino se decodifican, es decir, se unen y se convierten nuevamente en una señal de voz que es escuchada por el usuario receptor. En esta tecnología no se requiere de una infraestructura o líneas telefónicas separadas, por el contrario, funciona sobre el marco existente utilizado en el internet. Para esto cada dispositivo se encuentra registrado con un único número que lo identifica, el cual tiene el nombre de dirección del Protocolo de Internet (IP), que se asigna de manera dinámica, es decir, no es permanente como el número telefónico; al iniciar una llamada VoIP, se envía una señal al conmutador de software, el cual conoce la dirección IP actual de distintos dispositivos y busca la dirección con la cual se desea establecer la comunicación, si el conmutador no reconoce esta IP, se transmite hasta llegar al interruptor que contiene dicha información, una vez reconoce el punto final, establece la conexión e inicia la comunicación bidireccional¹⁴.

3.6. CODIFICADORES DE AUDIO

En la telefonía IP se establecen varios estándares para optimizar la tecnología, los cuales son: códecs, protocolos de transporte y servicios de directorio.

¹³ MILLICAR | Proceedings of the 2020 Workshop on ns-3 [Anónimo]. ACM Other conferences [página web]. [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://dl.acm.org/doi/10.1145/3389400.3389402>>.

¹⁴ CÓMO FUNCIONA un sistema de VoIP - VoIP Studio | VoIPstudio [Anónimo]. VoIPstudio [página web]. [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://voipstudio.es/blog/como-functiona-un-sistema-voip/>>.

Los códecs son algoritmos que permiten convertir una señal de audio analógico en un formato de audio digital a través de internet u otra red y luego convertirlo nuevamente a un formato descomprimido de señal de audio para poder reproducirlo, generalmente es instalado como un software en un servidor o incrustado en un hardware como Accesorio de Tecnología Avanzada (ATA), teléfono IP, etc. Estos, se encuentran divididos en dos categorías:

- Sin pérdida: Conservan toda la información de la transmisión original y por lo tanto mantienen la calidad de la señal audio/vídeo.
- Con pérdida: Reducen la calidad y el consumo de banda ancha, para lograr la compactación.

Para realizar la conversión de la información analógica a digital, los códecs toman muestras de la señal de audio miles de veces por segundo, luego convierte cada pequeña muestra en información digital y lo comprime para su transmisión. Cuando las 64,000 muestras son reconstruidas, los pedacitos de audio que se pierden en medio de estas son tan pequeños que es imposible para el oído humano notar la pérdida, esta suena como una sucesión continua de audio¹⁵¹⁶.

Los códecs normalmente se encargan de cumplir las siguientes tres tareas:

- Codificación – decodificación.
- Compresión – Descompresión de compresión.
- Cifrado (encriptación) – descifrado.

Los códecs se describen teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

Tasa de muestreo: Se expresa en Hertz (Hz) y es el número de muestras tomadas de una señal por segundo. Para una tasa de muestreo de F_s kHz, la frecuencia más alta que se puede representar es igual a $F_s/2$ kHz, donde $F_s/2$ se conoce como la frecuencia de Nyquist).

Tasa de Bits: Es la cantidad de bits por unidad de tiempo necesarios para codificar la voz. Se mide en bits por segundo (bps), o generalmente kilobits por segundo (kbps).

¹⁵ LOS CODECS en la Telefonía IP, ¿Qué Son y Cómo Funcionan? [Anónimo]. orade [página web]. [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://orade.com/los-codecs-en-la-telefonía-ip-que-son-y-como-funcionan/>>.

¹⁶ LÓPEZ, Ana. Codecs de telefonía IP. Qué son y cómo funcionan. Fonvirtual Blog [página web]. (7, octubre, 2020). [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://www.fonvirtual.com/blog/que-es-codec-telefonía-ip/>>.

Tasa de bits variable (VBR): La tasa de bits variable (VBR) permite que un códec cambie su tasa de bits dinámicamente para adaptarse a la "dificultad" del audio que se codifica.

VBR puede lograr una tasa de bits más baja para la misma calidad o una mejor calidad para una tasa de bits determinada. A pesar de sus ventajas, VBR tiene dos inconvenientes principales: primero, al especificar sólo la calidad, no hay garantía sobre la tasa de bits promedio final. En segundo lugar, para algunas aplicaciones en tiempo real como voz sobre IP (VoIP), lo que cuenta es la tasa de bits máxima, que debe ser lo suficientemente baja para el canal de comunicación.

Tasa de bits promedio (ABR): La tasa de bits promedio resuelve uno de los problemas de VBR, ya que ajusta dinámicamente la calidad de VBR para cumplir con una tasa de bits objetivo específica. Debido a que la calidad/velocidad de bits se ajusta en tiempo real (bucle abierto), la calidad global será ligeramente inferior a la obtenida mediante la codificación en VBR con la configuración de calidad exactamente correcta para cumplir con la velocidad de bits promedio objetivo.

Detección de actividad de voz (VAD): Cuando está habilitada, la detección de actividad de voz detecta si el audio que se codifica es voz o silencio/ruido de fondo. VAD siempre se activa implícitamente cuando se codifica en VBR, por lo que la opción solo es útil en operaciones que no son VBR.

Transmisión Discontinua (DTX): La transmisión discontinua es una adición a la operación VAD/VBR, que permite detener la transmisión por completo cuando el ruido de fondo es estacionario.

Ancho de banda (BW): Es la tasa máxima de transferencia de datos entre los extremos de la comunicación. Se debe garantizar un ancho de banda mínimo para este tipo de paquetes, pues las comunicaciones en tiempo real son muy sensibles al retraso y a la congestión que exista en la red. Los requerimientos de ancho de banda en voz IP son determinados por el codificador de voz que se está usando¹⁷.

Hay muchos codificadores para audio y video, a continuación, se mostrarán los que se utilizarán en este proyecto:

iLBC:

(internet Low Bitrate Codec), es un códec gratuito que como su nombre lo indica utiliza una tasa baja de bits, es adecuado para comunicaciones de voz robustas sobre IP. Está diseñado para voz de banda estrecha y da como resultado una tasa de bits de carga útil de 13,33 kbit/s con una longitud de trama de codificación de 30 ms y 15,20 kbps con una longitud de codificación de 20 ms. El códec iLBC permite una degradación elegante de

¹⁷ VOIP INFO, Resources, Guides & all things VOIP - VoIP-Info [Anónimo]. VoIP-Info [página web]. [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://www.voip-info.org/>>.

la calidad del habla en el caso de tramas perdidas, lo que ocurre en relación con paquetes IP perdidos o retrasados.

Características:

- Tasa de muestreo de 13,33 kbps (399 bits, empaquetados en 50 bytes) para el tamaño de trama de 30 ms y 15,2 kbps (303 bits, empaquetados en 38 bytes) para el tamaño de trama de 20 ms
- Calidad básica superior a G.729A , alta robustez a la pérdida de paquetes
- Complejidad computacional en un rango de G.729A
- Códec libre de regalías

OPUS:

Es un códec de audio gratuito, abierto, libre de regalías y muy versátil. Está diseñado para la transmisión interactiva de voz y música a través de Internet y para aplicaciones de almacenamiento. Está estandarizado por el Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet (IETF) como RFC 6716 que incorporó tecnología del códec SILK de Skype y el códec CELT de Xiph.Org. por esta razón puede manejar diferentes aplicaciones de audio, incluyendo voz sobre IP, videoconferencia, chat en el juego e incluso actuaciones de música en vivo remotas¹⁸.

Características:

- Tasas de bits de 6 kb/s a 510 kb/s
- Tasas de muestreo de 8 kHz (banda estrecha) a 48 kHz (banda completa)
- Tamaños de trama de 2,5 ms a 60 ms
- Compatibilidad con tasa de bits constante (CBR) y tasa de bits variable (VBR)
- Ancho de banda de audio de banda estrecha a banda completa
- Soporte para voz y música.
- Soporte para mono y estéreo
- Compatibilidad con hasta 255 canales (tramas multistream)
- Tasa de bits, ancho de banda de audio y tamaño de fotograma ajustables dinámicamente
- Buena robustez de pérdida y ocultación de pérdida de paquetes (PLC)
- Implementación de punto flotante y punto fijo.

3.7. CALIDAD DE SERVICIO (QoS)

En las comunicaciones de Voz IP los paquetes no tienen un orden de llegada definido, no poseen ningún tipo de reserva de recursos, no se reconoce un retraso máximo sufrido, y de esta manera brindan el mejor servicio posible; por tal razón es necesario definir la calidad de servicio, para determinar la capacidad de garantizar que se cumplan los

¹⁸ OPUS CODEC [Anónimo]. Opus Codec [página web]. [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://opus-codec.org/>>.

requisitos de tráfico para el flujo de información, llevando a cabo un correcto funcionamiento de las aplicaciones como voz y video en tiempo real. En el usuario la calidad de servicio se ve reflejada en términos de rapidez, fiabilidad, rendimiento y disponibilidad.

El tráfico de paquetes en el servicio de voz IP se realiza en forma desordenada, es decir, la información codificada y fragmentada genera un flujo de paquetes que siguen distintas rutas entre el origen y el destino, lo que genera que cada paquete pueda llegar con un retardo acumulado distinto y en el peor de los casos que no lleguen al destino, debido a las pérdidas que se pueden generar. Por tal razón es necesario establecer los siguientes requisitos para esta comunicación:

- **Retardo:** Existe ya que la comunicación a través de VoIP se realiza en tiempo real, generando los siguientes efectos en la conversación:
 - Eco: Se genera debido a las reflexiones de la señal transmitida, pues cuando el retardo supera el umbral de los 2 5mS, el transmisor detecta una señal molesta y retrasada de sus propias palabras. Si el retraso tiene niveles muy elevados, mantener la conversación sería imposible.
 - Talker Overlap: Existe cuando uno de los abonados se superpone a la voz del otro, consecuencia de un gran retardo de los paquetes, impidiendo la interacción de los locutores. Este fenómeno empieza a ser apreciable cuando el retardo supera el umbral de los 150 mS aproximadamente.
- **Pérdida de Paquetes:** Ocurre con frecuencia debido a una congestión en la red, en donde los paquetes empiezan a encolarse en la red llena, en donde llega un punto en el que no se reciben más paquetes y se desechan, por otro lado este fenómeno también es causado por un gran retraso al extremo del receptor y este quede descartado, y en las comunicaciones de Voz IP no existe una retransmisión de paquetes, pues esto implica un retardo adicional que generalmente no se tolera, por esta razón se hace uso del protocolo de transporte de datagramas de usuario (UDP).

La pérdida de paquetes genera un deterioro en la señal de voz, debido a que la trama contiene un fonema de voz, es decir, cuando se pierde un paquete se pierde el fonema de voz correspondiente. Cuando la tasa de pérdidas es pequeña no representa un gran problema puesto que los decodificadores incluyen mecanismos de interpolación y el cerebro humano es capaz de reconstruir el intervalo de conversación no recibida. Sin embargo, probabilísticamente, la pérdida de un paquete suele traducirse en la pérdida de varios de ellos, lo que sí degrada severamente la calidad de la comunicación.

- **Calidad de la comunicación:** Está íntimamente relacionada con la experiencia que tienen los usuarios finales de la conversación mantenida.

Existen medidas subjetivas que implican a personas físicas y métodos de medición que emulan la percepción del oído humano y permiten obtener una puntuación equivalente:

- Métodos subjetivos: Existen dos métodos para calcular la calidad del audio: por evaluación directa (ACR) o por comparación contra un audio de referencia (DCR).

Con evaluaciones directas se califica la calidad en función de una escala del uno al cinco, siendo cinco “excelente” y uno “malo” como se muestra a continuación:

Tabla 5
Escala MOS para evaluación directa.

Puntuación	Calidad
5	Excelente
4	Buena
3	Aceptable
2	Pobre
1	Mala

Por otro lado, cuando la evaluación es comparativa, el rango de calificación también oscila entre uno y cinco, pero en este caso se califica en función del esfuerzo empleado por los usuarios para entender la conversación debido a las diferencias entre el audio de referencia y el medido, así:

Tabla 6
Escala DMOS para evaluación comparativa

Puntuación	Calidad
5	Relajación completa: ningún esfuerzo
4	Necesidad de atención: esfuerzo aceptable
3	Esfuerzo Moderado
2	Esfuerzo considerado
1	Imposible de entender

- Métodos Objetivos: Están basados en mediciones de propiedades físicas de una red para estimar la evaluación de los usuarios, sin embargo, se diferencian de los métodos intrusivos que se basan en medir la degradación de la salida. Entre los métodos objetivos predominan tres recomendaciones de la ITU-T: el modelo E, la recomendación P.862 y la P.563.

- Modelo E: Está basado en una cuantificación escalar de la calidad del sonido que se estima que percibirá un usuario. Es usado como una herramienta informática para la planificación de la transmisión, incluye factores de degradación de la señal transmitida que reflejan los efectos de los dispositivos de red que intervienen en la generación, transmisión y conmutación de la señal de audio. Así, dicho modelo proporciona el factor R, el cual se puede traducir a una escala MOS tal como se refleja en la siguiente tabla:

-

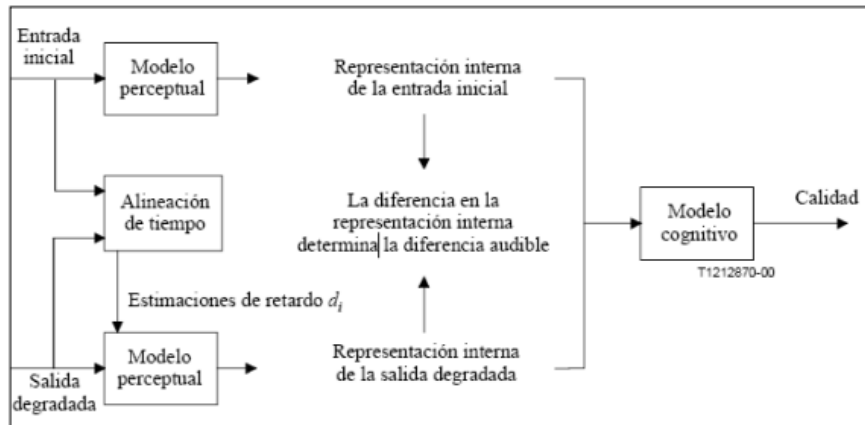
Figura 4 Traducción factor R a escala MOS

R	Satisfacción usuarios	MOS
100	Muy satisfechos	4,5
94,3		4,4
90		4,3
80	Satisfechos	4,0
70	Algunos insatisfechos	3,6
60		3,1
50	Casi todos insatisfechos	2,6
0	No recomendado	1,0

Deseable
 Acceptable
 No acceptable

- P.862: Este método se conoce como Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ), es un método intrusivo, es decir, inyecta en la red una señal de audio conocida para evaluar la calidad de la comunicación en el otro extremo, comparando la señal inicial conocida con una señal obtenida al otro lado de la red como consecuencia de transmitir por la misma. De esta manera, se obtiene una nota PESQ, equivalente a la puntuación MOS, correspondiente a un escalar en el rango -0,5 a 4,5.

Figura 5 Obtención de la calidad mediante el modelo PESQ



- P.563: Es un método no intrusivo, pues no necesita una señal de referencia, de esta manera se puede usar para la supervisión y evaluación cuando la red se encuentra en funcionamiento, utilizando señales de audio desconocidas. Este método evalúa la señal de varias formas, para detectar un conjunto de parámetros útiles, a partir de los cuales se determina la principal clase de distorsión presente. Existen 3 clases de distorsión: relativa al tracto vocal y desnaturalización de la voz; debida a un nivel de ruido adicional intenso y las interrupciones, y relacionada con los silenciamientos y recorte temporal. Cada clase de distorsión hace uso de una combinación lineal de diversos parámetros para generar la calidad vocal intermedia. La calidad vocal definitiva se calcula combinando los resultados de la calidad vocal intermedia con ciertas características adicionales de la señal de audio¹⁹.

¹⁹ CALIDAD DE SERVICIO EN VOIP [Anónimo]. [s.l.]: [s.n.]. 14 p.

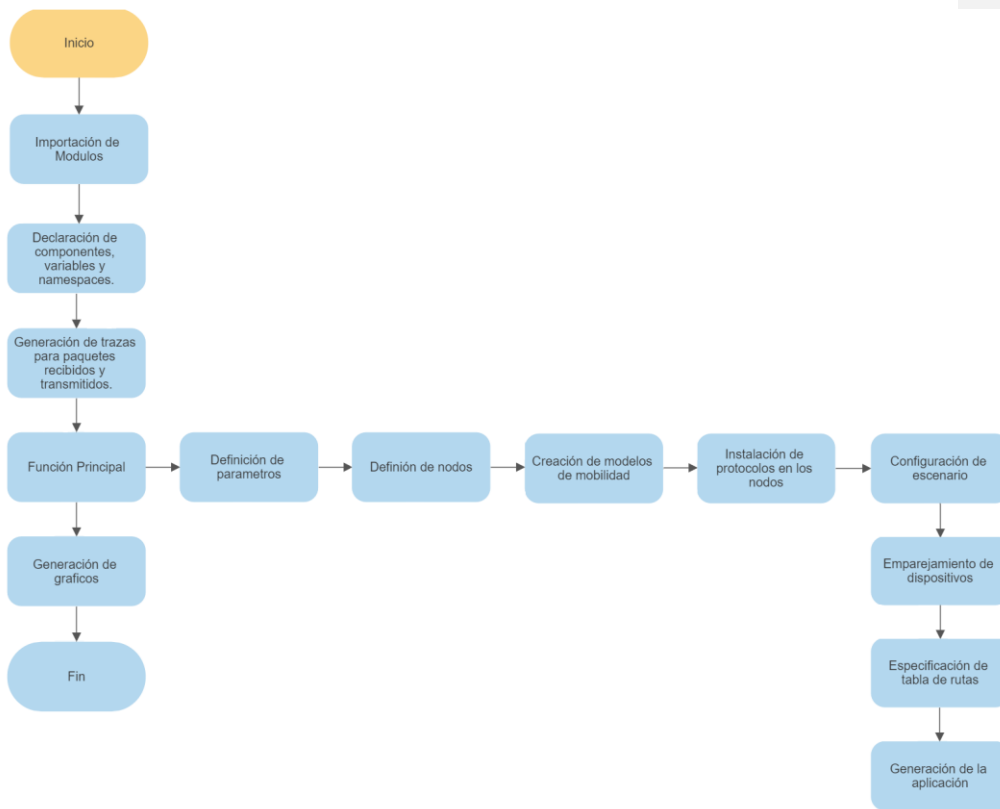
3 SIMULACIÓN DE COMUNICACIÓN 5G EN UN SISTEMA CELULAR V2V

En este capítulo se explicará a través de un diagrama de flujo el desarrollo del código que se encuentra en la parte de los anexos, el cual simula el escenario de dos vehículos que se comunican entre sí, este se realiza haciendo uso del simulador ns3, el cual tiene como lenguaje de programación C++, ya que este es un simulador de código abierto que cuenta con distintos módulos que facilitan la simulación de eventos discretos para sistemas de internet.

Commented [JJMM1]: Se recomienda ajustar las capturas de pantalla de las líneas de código de lenguaje C++ y convertirlas en pseudocódigos o diagramas de flujo.

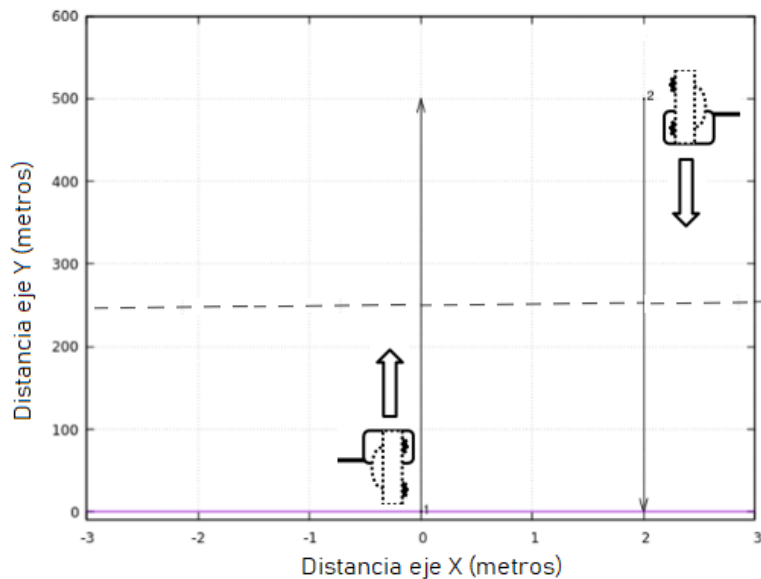
Commented [JJMM2R1]: Las líneas de código pueden colocarse en "Anexos"

Figura 6 Diagrama de Flujo de la aplicación



El diagrama de flujo anterior representa el código que simula dos vehículos que se encuentran a una distancia de 500 m uno del otro (eje y) y en carriles diferentes separados a una distancia de 2 metros (eje x), moviéndose a velocidades opuestas, intercambiando paquetes UDP mientras se encuentran en movimiento.

Figura 7 Representación gráfica de la simulación



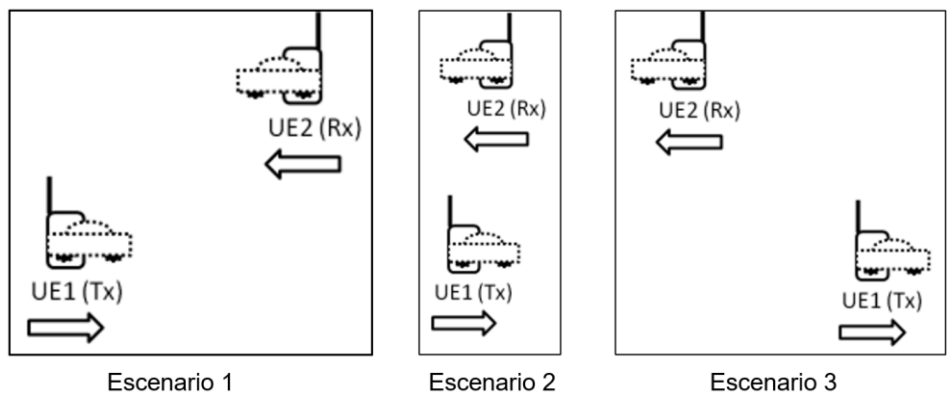
Los vehículos se mueven en velocidades opuestas con el fin de que el vehículo 1 termine en la distancia del eje y en donde inicia el vehículo dos y del mismo modo el vehículo 2 terminará en la distancia en el eje y donde inició el vehículo 1, para esto se determina el tiempo de simulación teniendo en cuenta la distancia que recorrerán los vehículos y la velocidad en que estos lo harán, teniendo en cuenta que se simularan 2 escenarios esta se varía, estableciendo 22 m/s para ciudad y 33 m/s para carretera, de esta manera se halla el tiempo de simulación para ambos escenarios así:

$$t = \frac{500 \text{ m}}{22 \text{ m/s}} = 22.72 \text{ s}$$

$$t = \frac{500 \text{ m}}{11 \text{ m/s}} = 45.45 \text{ s}$$

A su vez, esto permite que a lo largo de la simulación se experimenten 3 escenarios distintos, el primer escenario se presenta al iniciar, en donde los vehículos al tener velocidades opuestas intercambian paquetes UDP mientras se van acercando cada vez más, el segundo escenario es cuando este intercambio de paquetes se presenta mientras se cruzan, es decir, se encuentran en la misma posición en el eje Y pero separados por la distancia del eje x, lo siguiente que sucede una vez los vehículos se cruzan es que estos inician un intercambio de paquetes mientras se van alejando uno del otro.

Figura 8 Escenarios simulados



Este código se corre en Linux con el comando `./waf --run scratch/CarreteraV2V`, en donde se obtienen los siguientes datos para los escenarios de carretera y ciudad variando la velocidad como se mencionó anteriormente:

Tabla 7
Datos obtenidos

Velocidad		Primer instante de recepción (seg)	Último instante de recepción (seg)	Paquetes Enviados	Paquetes Perdidos	% Pérdidas	Rendimiento Promedio (Mbps)
m/s	km/h						
22	80	0,0513717	15,6374	57232	0,195241001	0,04881025	30,0811
33	120	0,05	15,4283	69955	0,344234079	0,08605852	37,2683

También genera un archivo `.txt` en donde se encuentran las trazas generadas en el transcurso de la simulación, a partir de estas se realizan las siguientes gráficas con el fin de comprender mejor lo que sucede en la comunicación de estos dos vehículos.

A continuación, se muestra la distancia recorrida por el vehículo 1 (eje X) contra el tiempo que tarda en enviar y recibir los datos, se observa que las trazas presentan 3 colores

(rojo, verde y naranja), el color rojo indica que el tiempo que se tarda en comunicar los datos está dentro del rango que se define como óptimo, es decir, en donde no hay pérdida de paquetes, el color naranja indica que empieza a tardarse un poco más de lo normal y por lo tanto hay una mínima pérdida, y por último el color verde determina que el tiempo supera el rango normal de comunicación y por tanto es muy probable que la mayoría de paquetes se pierdan.

En base a esto se puede concluir que al iniciar la simulación el tiempo de respuesta es mínimo, lo cual podría indicar que no hay pérdida de paquetes o que aún no inicia el envío de los mismos, ya que en este punto los vehículos se encuentran muy alejados entre sí, a medida que el vehículo avanza el tiempo de respuesta empieza a aumentar, coincidiendo en la posición en que los dos vehículos se van acercando, hasta llegar a cierto punto en donde hay un vacío, es decir, ya no hay un envío de paquetes y finalmente los valores del tiempo se asemejan a los iniciales, ya que para este momento los vehículos vuelven a tener la distancia inicial.

Este comportamiento es similar en las dos simulaciones, sin embargo, en el escenario de mayor velocidad el tiempo inicial se aumenta de una manera más temprana, ya que gracias a la velocidad la distancia entre los dos vehículos disminuye más rápido, permitiendo también que haya mayor envío de paquetes en el instante en que los vehículos se encuentran acercándose.

Figura 9 Pérdidas con velocidad de 79.2 km/h

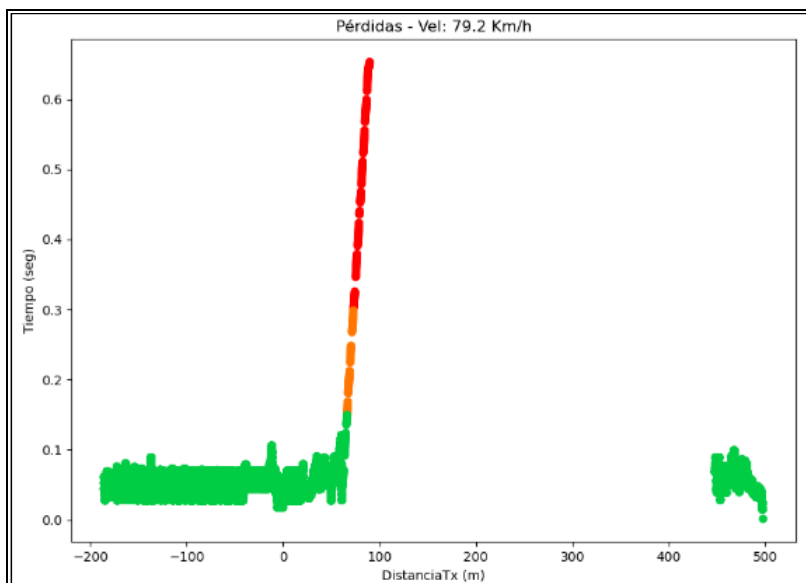


Figura 10 Pérdidas con velocidad de 118.8 km/h

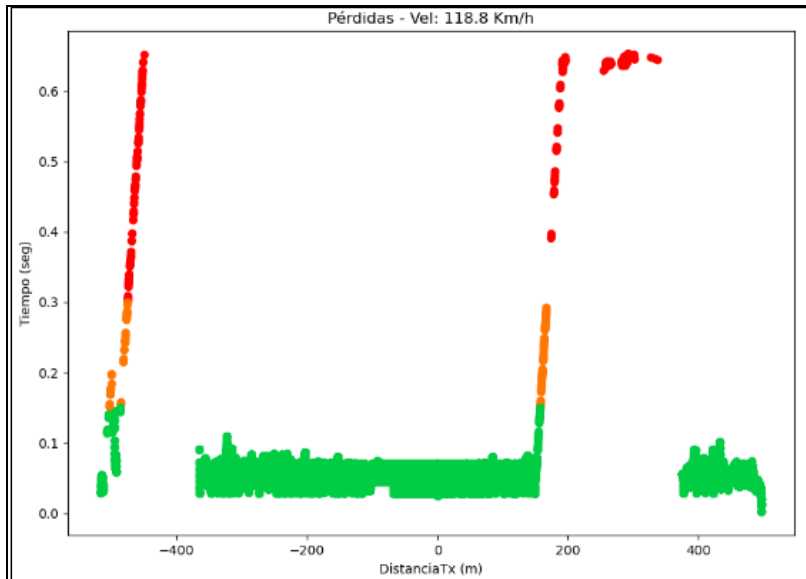


Figura 11 Instante de Recepción vs Bytes Leídos para velocidad de 79.2 km/h

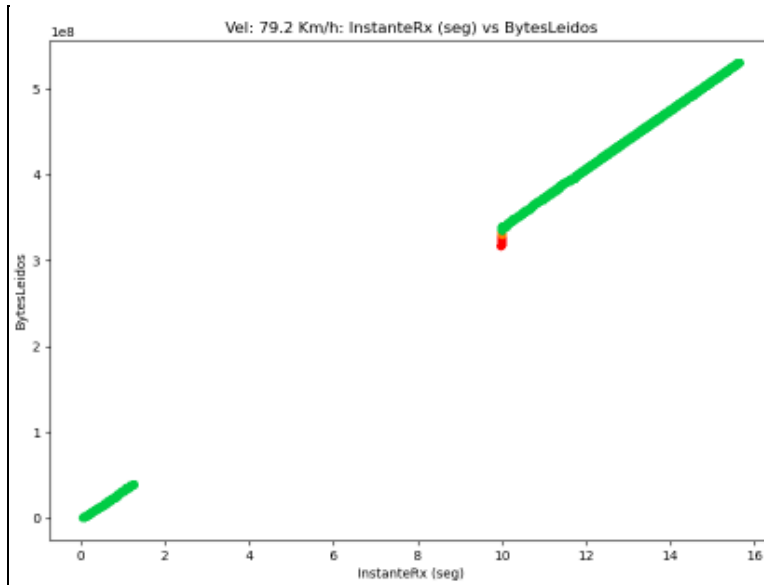
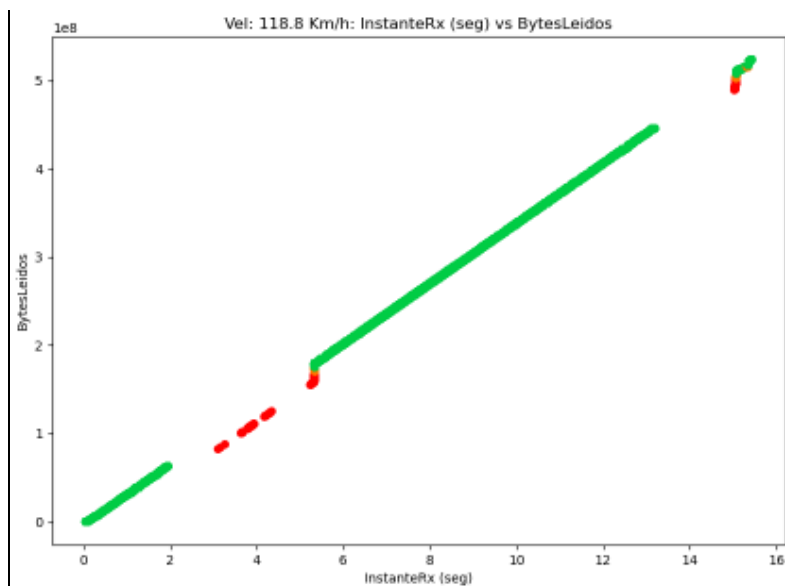


Figura 12 Instante de Recepción vs Bytes Leídos para velocidad de 118.8 km/h



4 CODIFICACIÓN Y DECODIFICACIÓN

Una vez obtenido el porcentaje de pérdida que se presenta en estos escenarios se procede a realizar la codificación y decodificación de los audios grabados en Audacity, los cuales cuentan con las siguientes características:

- 8 segundos de duración.
- 16 bits de codificación.
- 8KHz de frecuencia de muestreo
- 1 canal de grabación.

CODIFICACIÓN CON iLBC:

Para realizar este proceso lo primero que se realiza es generar el canal de audio, el cuál permite mapear la pérdida a partir de patrones que se obtienen al ejecutar el siguiente código:

```

1 import array, random
2
3 bit_audio = 400
4 porcentaje_perdida = 0
5 patrones_generados = 1
6 cantidad_ceros = int(bit_audio * porcentaje_perdida / 100)
7 print('cantidad_ceros: ' + str(cantidad_ceros))
8 contador_patron = 1
9 consecutivos = False
10 array_comparador = {}
11 array_comparador[0] = [1]*bit_audio
12 while(contador_patron <= patrones_generados):
13     patron = [1]*bit_audio # Se crea un arreglo de 1 teniendo en cuenta el tamaño del bit_audio
14     if consecutivos: # mejorar
15         posicion_paquetes_0_inicio = random.sample(range(1,bit_audio-1), 1) # Se genera un array que contiene las posiciones ran
16         posicion_paquetes_0 = random.sample(range(posicion_paquetes_0_inicio[0],posicion_paquetes_0_inicio[0]
17             +cantidad_ceros), cantidad_ceros)
18         print('posicion_paquetes_0: ' + str(posicion_paquetes_0))
19     else:
20         posicion_paquetes_0 = random.sample(range(1,bit_audio), cantidad_ceros) # Se genera un array que contiene las posiciones
21         contador_posicion = 0
22         while(contador_posicion <= cantidad_ceros - 1): # Toma el arreglo de 1 (patron) y pone ceros en las posiciones indicadas por
23             patron[posicion_paquetes_0[contador_posicion]] = 0
24             contador_posicion = contador_posicion + 1
25         # Se valida que no se repitan los patrones de perdida:
26         array_comparador[contador_patron] = patron
27         if array_comparador[contador_patron-1] == array_comparador[contador_patron] and porcentaje_perdida != 0:
28             print('son iguales')
29         else:
30             patron_generado = array.array("B", patron)
31             Nombre_Archivo = "Patron%d"%str(porcentaje_perdida)+"_"+str(contador_patron)+".bin"
32             with open(Nombre_Archivo, "wb") as archivo:
33                 patron_generado.tofile(archivo)
34             contador_patron = contador_patron + 1

```

Los patrones generados hacen referencia a un arreglo de ceros y unos, que simulan el canal, por el que se transmite el audio, en donde los ceros indican pérdidas y los 1 paquetes enviados correctamente, por esta razón lo que se hace en el código principalmente es generar dicho arreglo teniendo en cuenta el porcentaje de pérdida para poner los 0 equivalentes.

Teniendo los patrones se realiza la codificación y decodificación de los audios para cada patrón generado con el porcentaje de pérdida, es decir, para los escenarios simulados (carretera y ciudad), basados en la documentación del codificador iLBC se construye el siguiente código que permite realizar ese proceso:

```

1 import subprocess
2 porcentaje_perdida = 0
3 audio = "maria7"
4 contador_decodificados = 1
5
6 while(contador_decodificados <100):
7     subprocess.call(["Ejecutable_ILBC.exe", "20", audio+".wav",
8         "None", audio+"_"+str(porcentaje_perdida)+"_sin_perdidas_decodificado",
9         "Patron4_0_1.bin"])
10     contador_decodificados = contador_decodificados + 1
11
12

```

En donde el primer elemento que se llama es el ejecutable del codificador que se genera corriendo el main() de los archivos c++ descargados del codificador iLBC, el segundo es la duración de la trama que se define en 20mS ya que es un valor en el que puede

coincidir con los otros codificadores lo cual permite realizar un análisis comparativo de forma objetiva entre los tres; el tercer parámetro es el audio sin encabezado, el siguiente es el nombre del audio que se genera luego de la decodificación y codificación y el último es el patrón que simula el canal, el cual se generó en el punto anterior, todo esto dentro de un ciclo while que se repite n cantidad de veces, dependiendo de los audios que se quieran codificar, en este caso se generan audios que posteriormente serán evaluados.

CODIFICACIÓN CON OPUS:

En este codificador no se genera un canal, para simular las pérdidas como se hizo en el caso del iLBC, solo fue necesario descargar el ejecutable de la página oficial de OPUS para Windows y correr los siguientes comandos así:

```
1 import subprocess
2 import os
3 porcentaje_perdida = 0.86
4 audio = "maria"
5 contador_decodificados = 1
6
7 # Codificación:
8 subprocess.Popen("opusenc "+str(audio)+".wav outputEnc.opus")
9
10 while(contador_decodificados <=50):
11     # Decodificación:
12     if(os.path.exists('outputEnc.opus')):
13         subprocess.Popen("opusdec --packet-loss "+str(porcentaje_perdida)
14             +" outputEnc.opus outputDec"+str(contador_decodificados)+".wav")
15         contador_decodificados = contador_decodificados + 1
16
```

EVALUACION DE LOS CODIFICADORES

Se realiza la evaluación perceptual de la calidad del habla de los audios generados haciendo uso de los codificadores de la siguiente manera:

```

import subprocess

porcentaje_perdida = 0
audio = "audioMaria2"
contador = 1
resultado = []
valor = 0
archivo = open("Resultado5.csv", "w")

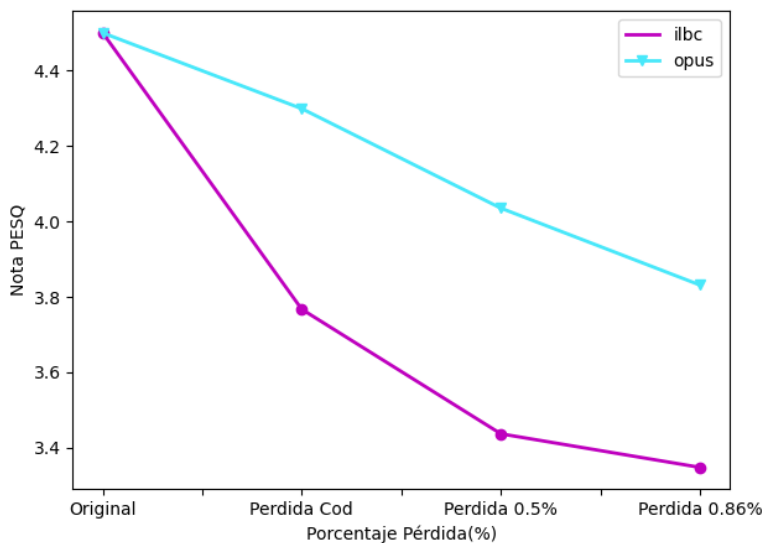
while (contador <= 50):
    subprocess.check_output(["Ejecutable_PESQ.exe", "+8000", audio+".wav",
        audio+"_"+str(porcentaje_perdida)+"_"+str(contador)+"decodificado"])

    subprocess.check_output(["Ejecutable_PESQ.exe", "+8000", audio+".wav",
        audio+"_"+str(porcentaje_perdida)+"_"+str(contador)+"decodificado"+contador+".wav"])

```

Una vez obtenidos las calificaciones generadas se realiza la gráfica obteniendo el promedio de para cada porcentaje de pérdida teniendo en cuenta los diferentes escenarios evaluados, de la siguiente manera:

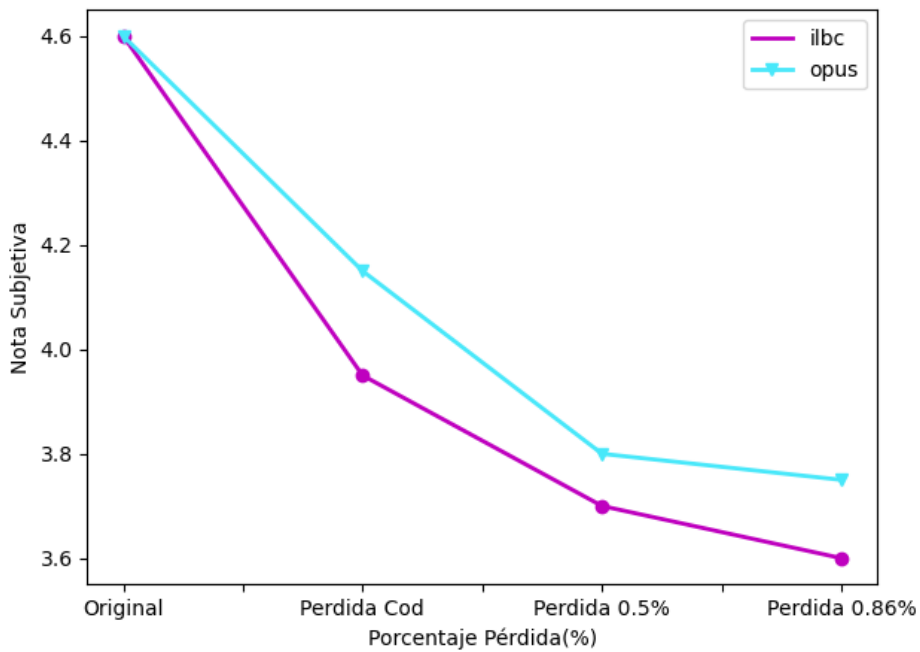
Figura 13 Evaluación PESQ



Por otro lado, se realiza una encuesta en googleForms en donde distintas personas evalúan la calidad de los audios generados con el fin de obtener la calificación subjetiva, encuesta que se encuentra en el siguiente link:

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSc3hygtp4JkzhJdeP9crT5_ifEEv_pVAoumc5N9GQjtGpxmEw/viewform

Figura 14 Evaluación Subjetiva



En las gráficas anteriores se puede observar que tanto en la calificación subjetiva como en la objetiva el codec OPUS presentó una mejor calidad en los audios entregados que el codec iLBC, demostrando así que la calificación PESQ es una manera muy versátil de evaluar diferentes audios, ya que tiene una concordancia con la calificación que le dieron los usuarios a los audios, por otro lado, se puede ver que OPUS genera audios más limpios, siendo este la mejor opción de codificador para estas aplicaciones, debido

5 CONCLUSIONES

Con este proyecto se logró analizar y comparar el funcionamiento de los codificadores iLBC y OPUS en sistemas de comunicación celular V2V de 5G, generando bases y recomendaciones sobre estos códecs al plan de desarrollo de 5G de la región.

El módulo millicar de NS3 permite realizar simulaciones de pila completa de extremo a extremo de redes vehiculares con un modelo de canal 3GPP para propagación V2V y desvanecimiento en ondas milimétricas, capas físicas y MAC rediseñadas para NR V2X e integración con las capas superiores de la pila de protocolos (p. , RLC) de ns-3, que al ser de código abierto ayuda al estudio y análisis de estos sistemas teniendo en cuenta la estandarización de redes inalámbricas en los nuevos casos de uso para las aplicaciones que propone la nueva generación de comunicaciones móviles 5G.

Para realizar el análisis de los codificadores en una comunicación 5G se definieron 3 escenarios puntuales y decisivos, el primero es cuando dos vehículos se acercan entre sí, y la distancia entre ellos disminuye a medida que el tiempo pasa, el segundo cuando los dos vehículos se cruzan y el tercero cuando estos se alejan aumentando la distancia a medida que el tiempo avanza, por otro lado, se decidió también variar la velocidad en cada una de estas simulaciones con el fin de observar la influencia que tiene este factor (la velocidad) en la pérdida de paquetes en estos casos, además estos 3 escenarios se escogieron ya que permiten obtener una visión general del comportamiento de dicha comunicación y se simularon haciendo uso del módulo millicar de NS3 ya que aparte de ser un simulador de código abierto, lo que permitió realizar modificaciones que se ajustaran a los escenarios planeados, también tenía incorporados los modelos de canal y diferentes estándares establecidos para las comunicaciones 5G por la 3GPP, generando así trazas que posibilitaron el estudio de las pérdidas en estos escenarios.

PESQ proporciona una correlación significativa con la opinión subjetiva de los usuarios, por lo que se concluye que PESQ es adecuado para muchas aplicaciones en la evaluación de la calidad del habla para los códecs de voz.

Gracias a las evaluaciones subjetivas y objetivas realizadas se puede concluir que el codificador que mejor responde a las pérdidas obtenidas en estos tres escenarios es el códec de OPUS ya que en todos los escenarios presenta una calificación mayor a los audios que se codificaron haciendo uso de iLBC, pues el OPUS utiliza estrategias de codificación más avanzadas y adaptables, lo que permite una mejor calidad de audio a diferentes velocidades de bits y en diferentes tipos de señales de audio.

OPUS tiene técnicas de codificación de audio de baja latencia y adaptativa que seleccionan automáticamente la mejor estrategia de codificación para cada parte de la señal de audio, lo que permite una mejor calidad de audio en una amplia variedad de

situaciones, incluyendo conversaciones de voz en tiempo real, música, y señales de audio de baja calidad.

Por otro lado, iLBC fue diseñado principalmente para aplicaciones de voz sobre IP y utiliza una técnica de codificación de audio más simple, que produce una calidad de audio más baja en comparación con OPUS.

6 RECOMENDACIONES

Aunque este proyecto realiza un análisis completo de dos codificadores muy usados, se pueden realizar algunas mejoras con el fin de contemplar otros factores que pueden influir en la comunicación 5G V2V, tales como, simular otros escenarios, por ejemplo, cuando se encuentran varios vehículos (en pelotón) comunicándose entre sí yendo en la misma dirección, pues con esto se lograría analizar la interferencia que puede llegar a existir entre las diferentes señales que se envían al tiempo.

Por otro lado, sería importante simular obstáculos, que permitan proyectar cada vez más un escenario real, donde se encuentran obstáculos como edificios, casas, señales de tránsito, árboles, lluvia, etc.

También es recomendable analizar otros codificadores similares al OPUS que permiten dar una conclusión más detallada sobre cuál es el mejor dentro de los codificadores con características similares a este.

Finalmente, para futuras investigaciones en el tema se recomienda también hacer uso de otros evaluadores de calidad de voz con el fin de corroborar de otra forma además de la evaluación subjetiva los resultados obtenidos por este evaluador.

7 REFERENCIAS

- 3GPP 5G Formally Endorsed as ITU IMT-2020 5G Standard [Anónimo]. Huawei [página web]. (4, julio, 2020). [Consultado el 10, febrero, 2022]. Disponible en Internet: <<https://www.huawei.com/en/news/2020/7/3gpp-itu-imt-2020-5g-standard>>.
- [Anónimo]. huawei [página web]. (14, junio, 2020). [Consultado el 12, octubre, 2022]. Disponible en Internet: <<https://www.huawei.com/en/news/2020/7/3gpp-itu-imt-2020-5g-standard>>.
- 5G – Quinta generación de tecnologías móviles [Anónimo]. ITU [página web]. (abril, 2022). [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://www.itu.int/es/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>>.
- ANZOLA, Miguel Felipe. Del 1G al 5G: la evolución de las redes móviles tras el cambio de generación | DPL News. DPL News [página web]. (3, agosto, 2020). [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://dplnews.com/del-1g-al-5g-la-evolucion-de-las-red-es-moviles-tras-el-cambio-de-generacion/>>.
- CALIDAD DE SERVICIO EN VOIP [Anónimo]. [s.l.]: [s.n.]. 14 p.
- ¿CÓMO FUNCIONA una red móvil? - Las ondas [Anónimo]. Las ondas [página web]. [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://radio-waves.orange.com/es/como-funciona-una-red-movil/>>.
- CÓMO FUNCIONA un sistema de VoIP - VoIP Studio | VoIPstudio [Anónimo]. VoIPstudio [página web]. [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://voipstudio.es/blog/como-funciona-un-sistema-voip/>>.
- EVOLUCIÓN DE la red de comunicación móvil, del 1G al 5G [Anónimo]. VIU [página web]. [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://www.universidadviu.com/int/actualidad/nuestros-expertos/evolucion-de-la-red-de-comunicacion-movil-del-1g-al-5g>>.
- GIRAO, David. Diferencias entre el 3G, 4G y 5G en los móviles. Evolución y futuro. MovilZona [página web]. (28, agosto, 2020). [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://www.movilzona.es/2020/08/28/diferencias-redes-3g-4g-5g-evolucion-futuro/>>.
- LÓPEZ, Ana. Codecs de telefonía IP. Qué son y cómo funcionan. Fonvirtual Blog [página web]. (7, octubre, 2020). [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://www.fonvirtual.com/blog/que-es-codec-telefonía-ip/>>.
- LOS CODECS en la Telefonía IP, ¿Qué Son y Cómo Funcionan? [Anónimo]. orade [página web]. [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://orade.com/los-codecs-en-la-telefonía-ip-que-son-y-como-funcionan/>>.
- MILLICAR | Proceedings of the 2020 Workshop on ns-3 [Anónimo]. ACM Other conferences [página web]. [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://dl.acm.org/doi/10.1145/3389400.3389402>>.
- MINISTERIO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y. LAS COMUNICACIONES. Plan tic 2018-2022 [en línea]. Bogota: MinTIC, 2018 [consultado el 22, febrero, 2020]. 107 p. Disponible en Internet: <https://micrositios.mintic.gov.co/plan_tic_2018_2022/pdf/plan_tic_2018_2022_20191121.pdf>.

OPUS CODEC [Anónimo]. Opus Codec [página web]. [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://opus-codec.org/>>.

PLOKIKO. Del 1G al 5G: así funcionan las redes móviles y todo lo que cambia tras cada salto de generación. Xataka Móvil - Teléfonos móviles, tarifas, operadores de telefonía [página web]. (13, abril, 2020). [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://www.xatakamovil.com/conectividad/1g-al-5g-asi-funcionan-redes-moviles-todo-que-cambia-cada-salto-generacion>>.

TELECOMUNICACIONES [Anónimo]. Informática Aplicada a las Ciencias Sociales. Telecomunicaciones. Rafael Barzanallana. UMU [página web]. [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://www.um.es/docencia/barzana/IACCSS/Telecomunicaciones.html>>.

VOIP INFO, Resources, Guides & all things VOIP - VoIP-Info [Anónimo]. VoIP-Info [página web]. [Consultado el 28, enero, 2023]. Disponible en Internet: <<https://www.voip-info.org/>>.

8. ANEXOS

```
#include "ns3/mmwave-sidelink-spectrum-phy.h"
#include "ns3/mmwave-vehicular-net-device.h"
#include "ns3/mmwave-vehicular-helper.h"
#include "ns3/constant-position-mobility-model.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/config.h"
#include "ns3/isotropic-antenna-model.h"
#include "ns3/spectrum-helper.h"
#include "ns3/mmwave-spectrum-value-helper.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/node-list.h"

NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("VehicularSimpleOne");

using namespace ns3;
using namespace millicar;

void PrintGnuplottableNodeListToFile (std::string filename);

uint32_t g_rxPackets;
uint32_t g_txPackets;

Time g_firstReceived;
Time g_lastReceived;
```

```

static void Rx (Ptr<OutputStreamWrapper> stream, Ptr<const Packet> p)
{
    g_rxPackets++;
    SeqTsHeader header;
    p->PeekHeader(header);
    *stream->GetStream () << Simulator::Now ().GetSeconds () << "\t"
    g_rxPackets << "\t" << p->GetSize() << "\t" << header.GetSeq() << "\t"
    << header.GetTs().GetSeconds() << std::endl;
    if (g_rxPackets > 1)
    {
        g_lastReceived = Simulator::Now();
    }
    else
    {
        g_firstReceived = Simulator::Now();
    }
}

int main (int argc, char *argv[])
{
    // system parameters
    double bandwidth = 1e8;
    double frequency = 28e9;
    uint32_t numerology = 3;
    // applications
    uint32_t packetSize = 1024;
    uint32_t startTime = 50;
    uint32_t endTime = 2000;
    uint32_t interPacketInterval = 30;
    // mobility
    double speed = 20;
    double intraGroupDistance = 10;
    double laneDistance = 10;

```

```

CommandLine cmd;
    cmd.AddValue ("bandwidth", "used bandwidth", bandwidth);
    cmd.AddValue ("iip", "inter packet interval, in microseconds",
interPacketInterval);
    cmd.AddValue ("laneDistance ", "distance between two vehicles
belonging to the same group, x-coord", laneDistance);
    cmd.AddValue ("intraGroupDistance", "distance between two vehicles
belonging to the same group, y-coord", intraGroupDistance);
    cmd.AddValue ("numerology", "set the numerology to use at the
physical layer", numerology);
    cmd.AddValue ("frequency", "set the carrier frequency", frequency);
    cmd.Parse (argc, argv);

    Config::SetDefault ("ns3::MmWaveSidelinkMac::UseAmc", BooleanValue
(true));
    Config::SetDefault          ("ns3::MmWavePhyMacCommon::CenterFreq",
DoubleValue (frequency));
    Config::SetDefault          ("ns3::MmWaveVehicularHelper::Bandwidth",
DoubleValue (bandwidth));
    Config::SetDefault          ("ns3::MmWaveVehicularHelper::Numerology",
UIntegerValue (numerology));
    Config::SetDefault
("ns3::MmWaveVehicularPropagationLossModel::ChannelCondition",
StringValue ("a"));
    Config::SetDefault
("ns3::MmWaveVehicularPropagationLossModel::Shadowing", BooleanValue
(true));
    Config::SetDefault
("ns3::MmWaveVehicularSpectrumPropagationLossModel::UpdatePeriod",
TimeValue (MilliSeconds (1)));
    Config::SetDefault
("ns3::MmWaveVehicularAntennaArrayModel::AntennaElements",
UIntegerValue (16));
    Config::SetDefault
("ns3::MmWaveVehicularAntennaArrayModel::AntennaElementPattern",
StringValue ("3GPP-V2V"));

```

```

Config::SetDefault
("ns3::MmWaveVehicularAntennaArrayModel::IsotropicAntennaElements",
BooleanValue (true));

Config::SetDefault
("ns3::MmWaveVehicularAntennaArrayModel::NumSectors", UIntegerValue
(2));

Config::SetDefault      ("ns3::MmWaveVehicularNetDevice::RlcType",
StringValue("LteRlcUm"));

Config::SetDefault
("ns3::MmWaveVehicularHelper::SchedulingPatternOption",
EnumValue(2)); // use 2 for SchedulingPatternOption=OPTIMIZED, 1 or
SchedulingPatternOption=DEFAULT

Config::SetDefault ("ns3::LteRlcUm::MaxTxBufferSize", UIntegerValue
(500*1024));

NodeContainer n;
n.Create (2);
MobilityHelper mobility;
mobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantVelocityMobilityModel");
mobility.Install (n);
n.Get (0)->GetObject<MobilityModel> ()->SetPosition (Vector
(0,0,0));
n.Get (0)->GetObject<ConstantVelocityMobilityModel> ()->
SetVelocity (Vector (0, speed, 0));

n.Get (1)->GetObject<MobilityModel> ()->SetPosition (Vector
(intraGroupDistance, laneDistance,0));
n.Get (1)->GetObject<ConstantVelocityMobilityModel> ()->SetVelocity
(Vector (0, -speed, 0));

// create and configure the helper
Ptr<MmWaveVehicularHelper> helper =
CreateObject<MmWaveVehicularHelper> ();
helper->SetNumerology (3);
helper->SetPropagationLossModelType
("ns3::MmWaveVehicularPropagationLossModel");

```

```

helper->SetSpectrumPropagationLossModelType
("ns3::MmWaveVehicularSpectrumPropagationLossModel");
NetDeviceContainer devs = helper->InstallMmWaveVehicularNetDevices
(n);
InternetStackHelper internet;
internet.Install (n);

Ipv4AddressHelper ipv4;
NS_LOG_INFO ("Assign IP Addresses.");
ipv4.SetBase ("10.1.1.0", "255.255.255.0");
Ipv4InterfaceContainer i = ipv4.Assign (devs);
helper->PairDevices(devs);
Ipv4StaticRoutingHelper ipv4RoutingHelper;
Ptr<Ipv4StaticRouting> staticRouting =
ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (n.Get (0)->GetObject<Ipv4> ());
staticRouting->SetDefaultRoute (n.Get (1)->GetObject<Ipv4> (-
>GetAddress (1, 0).GetLocal () , 2 );

NS_LOG_DEBUG("IPv4 Address node 0: " << n.Get (0)->GetObject<Ipv4>
()->GetAddress (1, 0).GetLocal ());
NS_LOG_DEBUG("IPv4 Address node 1: " << n.Get (1)->GetObject<Ipv4>
()->GetAddress (1, 0).GetLocal ());

Ptr<mmwave::MmWaveAmc> m_amc = CreateObject <mmwave::MmWaveAmc>
(helper->GetConfigurationParameters());

Config::SetDefault ("ns3::UdpClient::MaxPackets", UIntegerValue
(0xFFFFFFFF));
Config::SetDefault ("ns3::UdpClient::Interval", TimeValue
(MicroSeconds (interPacketInterval)));
Config::SetDefault ("ns3::UdpClient::PacketSize", UIntegerValue
(packetSize));

```

```

uint32_t port = 4000;
UdpEchoServerHelper server (port);
ApplicationContainer echoApps = server.Install (n.Get (1));
echoApps.Start (Seconds (0.0));
AsciiTraceHelper asciiTraceHelper;
Ptr<OutputStreamWrapper> stream = asciiTraceHelper.CreateFileStream
("my-third-simple-one-stats.txt");
    echoApps.Get(0)->TraceConnectWithoutContext      ("Rx",
MakeBoundCallback (&Rx, stream));
UdpClientHelper client (n.Get (1)->GetObject<Ipv4> ()->GetAddress
(1, 0).GetLocal (), port);
ApplicationContainer apps = client.Install (n.Get (0));
apps.Start (Milliseconds (startTime));
apps.Stop (Milliseconds (endTime));
PrintGnuplottableNodeListToFile
("my_third_scenario_change_time.txt");
Simulator::Stop (Milliseconds (endTime + 1000));
Simulator::Run ();
Simulator::Destroy ();
std::cout << "----- Statistics -----" << std::endl;
    std::cout << "g_lastReceived.GetSeconds():\t\t" <<
g_lastReceived.GetSeconds()<< std::endl;
    std::cout << "g_firstReceived.GetSeconds():\t\t" <<
g_firstReceived.GetSeconds()<< std::endl;
    std::cout << "Packets size-tamanoPaquetes:\t\t" << packetSize <<
" Bytes" << std::endl;
    std::cout << "Packets received-PaquetesRecibidos:\t" << g_rxPackets
<< std::endl;
    std::cout << "Average Throughput-RendimientoPromedio:\t" <<
(double(g_rxPackets)*(double(packetSize)*8)/double(
g_lastReceived.GetSeconds() - g_firstReceived.GetSeconds()))/1e6 <<
" Mbps" << std::endl;

    return 0;
}

```

```

PrintGnuplottableNodeListToFile (std::string filename)
{
    std::ofstream outFile;
    outFile.open (filename.c_str (), std::ios_base::out |
std::ios_base::trunc);
    if (!outFile.is_open ())
    {
        NS_LOG_ERROR ("Can't open file " << filename);
        return;
    }
    outFile << "set xrange [-20:20]; set yrange [-20:20]" << std::endl;

    for (NodeList::Iterator it = NodeList::Begin (); it != NodeList::End
()); ++it)
    {
        Ptr<Node> node = *it;
        int nDevs = node->GetNDevices ();
        for (int j = 0; j < nDevs; j++)
        {
            Ptr<MmWaveVehicularNetDevice> vdev = node->GetDevice (j)-
>GetObject <MmWaveVehicularNetDevice> ();
            if (vdev)
            {
                Vector pos = node->GetObject<MobilityModel> ()-
>GetPosition ();
                outFile << "set label \"" << vdev->GetMac ()->GetRnti
()
                    << "\" at "<< pos.x << "," << pos.y << " left
font \"Helvetica,8\" textcolor rgb \"black\" front point pt 7 ps 0.3
lc rgb \"black\" offset 0,0"
                    << std::endl;
            }
        }
    }
}

```