



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Implementación de algoritmos de medición de QoS para redes LTE  
utilizando el simulador OMNeT++**

AUTOR:

Toro Zambrano, Anthony Gabriel

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de  
**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

TUTOR:

M. Sc. Pacheco Bohórquez, Héctor Ignacio

Guayaquil, Ecuador

3 de marzo del 2020



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. **Toro Zambrano, Anthony Gabriel** como requerimiento parcial para la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

---

M. Sc. Pacheco Bohórquez, Héctor Ignacio

DIRECTOR DE CARRERA

---

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, 3 de marzo del 2020



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Toro Zambrano, Anthony Gabriel**

**DECLARÓ QUE:**

El trabajo de titulación: **“Implementación de algoritmos de medición de QoS para redes LTE utilizando el simulador OMNeT++”**, previo a la obtención del Título de **Ingeniero en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, 3 de marzo del 2020

EL AUTOR

---

Toro Zambrano, Anthony Gabriel



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Toro Zambrano, Anthony Gabriel**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **“Implementación de algoritmos de medición de QoS para redes LTE utilizando el simulador OMNeT++”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 3 de marzo del 2020

EL AUTOR

---

Toro Zambrano, Anthony Gabriel

# REPORTE DE URKUND

**URKUND** Lista de fuentes Bloques Fernando Palacios Meléndez (edwin\_palac)

<b>Documento</b>	<a href="#">Anthony_Toro_MET2020.docx</a> (D63909942)
<b>Presentado</b>	2020-02-14 09:59 (-05:00)
<b>Presentado por</b>	fernandopm23@hotmail.com
<b>Recibido</b>	edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com
<b>Mensaje</b>	Revisión TT Anthony Toro <a href="#">Mostrar el mensaje completo</a> 1% de estas 22 páginas, se componen de texto presente en 1 fuentes.

Categoría	Enlace/nombre de archivo
>	<a href="https://docplayer.es/166560603-Universidad-catolic...">https://docplayer.es/166560603-Universidad-catolic...</a>
	<a href="https://docplayer.es/1629366-Universidad-de-costa...">https://docplayer.es/1629366-Universidad-de-costa...</a>
<b>Fuentes alternativas</b>	
<b>Fuentes no usadas</b>	

0 Advertencias. Reiniciar Exportar Compartir

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

Implementación de algoritmos de medición de QoS para redes LTE utilizando el simulador OMNeT++

AUTOR: Toro Zambrano, Anthony Gabriel

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de INGENIERO en Telecomunicaciones

TUTOR: M. Sc. Pacheco Bohórquez, Héctor Ignacio

Guayaquil, Ecuador

12 de febrero del 2020

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

## **Dedicatoria**

Este proyecto va dedicado a mis padres, por su esfuerzo y apoyo incondicional. A mis abuelos que han sido un pilar fundamental a lo largo de mi vida y para guiarme por el camino académico, a mis tíos que han sido un ejemplo de vida.

## **Agradecimientos**

A mi familia que con la bendición de Dios impulsaron mi carrera profesional.

A mis docentes que formaron parte de mi desarrollo académico en todo este proceso.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**M. Sc. ROMERO PAZ MANUEL DE JESÚS**  
DECANO

f. \_\_\_\_\_

**M. Sc. ZAMORA CEDEÑO, NESTOR ARMANDO**  
COORDINADOR DE ÁREA

f. \_\_\_\_\_

**M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNNDO**  
OPONENTE



## ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.....	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Definición del problema .....	3
1.4. Justificación del problema a investigar.....	4
1.5. Objetivos.....	4
1.6. Hipótesis.....	5
1.7. Metodología de investigación.....	5
Capítulo 2: Conceptos básicos de redes LTE.....	6
2.1. Evolución a largo plazo (LTE).....	6
2.2. Tecnologías detrás del acceso de radio LTE.....	9
2.3. Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA).....	10
2.4. Programación dependiente del canal .....	12
2.5. Ancho de banda y flexibilidad de espectro .....	13
2.6. Informes de indicadores de calidad de canal (CQI) y la modulación y codificación adaptativa (AMC).....	14
2.7. Solicitud de repetición automática híbrido (HARQ). .....	15
2.8. Arquitectura del sistema LTE.....	16
2.8.1. Protocolos de acceso por radio .....	17
2.8.2. Capa MAC.....	18
2.8.3. Estructura de trama de enlace descendente .....	21
2.8.4. Asignación de recursos .....	23
2.9. Programación de algoritmos.....	25
2.10. Algoritmos de programación en tiempo no real .....	27
Capítulo 3: Desarrollo de la propuesta.....	28
3.1. Propuesta de algoritmos de programación.....	28
3.2. Entorno de simulación .....	34

3.2.1.	Herramienta de simulación OMNeT++.....	34
3.2.2.	Simulación de escenarios y parámetros.....	36
3.3.	Resultados de la simulación de algoritmos propuestos.....	38
3.3.1.	Análisis de resultados obtenidos para el primer y segundo algoritmo.....	38
3.3.2.	Análisis de resultados obtenidos para el tercer algoritmo. ....	42
	Conclusiones .....	51
	Recomendaciones .....	52
	Bibliografía .....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 2:

Figura 2. 1: Evolución de la red celular de GSM a LTE. ....	7
Figura 2. 2: Interfaces S1 y S2 de LTE. ....	8
Figura 2. 3: Descripción general del acceso de radio LTE.....	10
Figura 2. 4: Subportadoras OFDM.....	11
Figura 2. 5: Programación de enlace descendente en dominios de tiempo y frecuencia. ....	12
Figura 2. 6: División de frecuencia y tiempo dúplex.....	14
Figura 2. 7: LTE RAN - Arquitectura EPC.....	16
Figura 2. 8: Flujo de capa de enlace descendente LTE.....	17
Figura 2. 9: Informes de estado del bloque de transporte.....	20
Figura 2. 10: Estructura de trama de enlace descendente LTE.....	21
Figura 2. 11: Tramado LTE - Estructura de ranura. ....	22
Figura 2. 12: Prefijo del ciclo del período de guardia.....	23
Figura 2. 13: Modelo simplificado de asignación de recursos.....	24

### Capítulo 3:

Figura 3. 1: Diagrama de flujo del algoritmo de programación. ....	29
Figura 3. 2: Pseudocódigo del primer algoritmo.....	30
Figura 3. 3: Pseudocódigo del segundo algoritmo.....	31
Figura 3. 4: Algoritmo-3 de asignación de radio base con prioridad de tráfico. .....	32
Figura 3. 5: Ejemplo de entorno de simulación OMNeT++. ....	35
Figura 3. 6: Interface gráfica de usuario (GUI) de OMNeT++. ....	36
Figura 3. 7: Entorno de simulación. ....	37
Figura 3. 8: Pérdida de paquetes de tráfico en tiempo real para UDP.....	38
Figura 3. 9: Pérdida de paquetes de tráfico en tiempo no real para TCP. ...	39
Figura 3. 10: Rendimiento del tráfico en tiempo no real para TCP. ....	40
Figura 3. 11: Pérdida de paquetes de tráfico en tiempo real para UDP.....	41
Figura 3. 12: Equidad del tráfico en tiempo no real para UDP.....	41
Figura 3. 13: Equidad del tráfico RT (UDP). ....	42

Figura 3. 14: Retardo de VoIP para MaxC / I y PF.....	42
Figura 3. 15: Retardo de video para MaxC/I y PF.....	43
Figura 3. 16: Pérdida de paquetes de VoIP para MaxC / I y PF. ....	44
Figura 3. 17: Pérdida de paquetes TCP (FTP) para MaxC/I y PF.....	44
Figura 3. 18: Rendimiento UDP (VoIP, Video) para MaxC / I y PF. ....	45
Figura 3. 19: Rendimiento TCP (FTP) para MaxC / I y PF.....	45
Figura 3. 20: Retardo de VoIP para MaxC/I, PF y 3er algoritmo.....	46
Figura 3. 21: Retardo de Video para MaxC/I, PF y 3er algoritmo. ....	46
Figura 3. 22: Rendimiento TCP para MaxC/I, PF y 3er algoritmo. ....	47
Figura 3. 23: Rendimiento de video para MaxC/I, PF y 3er algoritmo.....	47
Figura 3. 24: Rendimiento de VoIP para MaxC/I, PF y 3er algoritmo. ....	48
Figura 3. 25: Pérdida de paquetes UDP para MaxC/I, PF y 3er algoritmo...	49
Figura 3. 26: Equidad TCP para MaxC / I, PF y 3er algoritmo.....	49
Figura 3. 27: Equidad UDP para MaxC/I, PF y 3er algoritmo. ....	50

## ÍNDICE DE TABLAS

### Capítulo 2:

Tabla 2. 1: Relación entre el ancho de banda del canal, los bloques de recursos correspondientes.....	14
Tabla 2. 2: Tipos de canales LTE. ....	18
Tabla 2. 3: Mapeo de valores CQI versus MCS.....	24

### Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Parámetros de simulación.....	37
---	----

## Resumen

La presente documentación refiere al trabajo de titulación denominado “Implementación de algoritmos de medición de QoS para redes LTE utilizando el simulador OMNeT++”. En este trabajo se realiza una breve descripción de las generalidades de la problemática a resolver, como la introducción, los antecedentes, definición y justificación del problema de investigación. Todo esto se define de manera clara para posteriormente plantear el objetivo general y los específicos del trabajo de titulación. Posteriormente, se realiza la caracterización de los fundamentos de redes inalámbricas móviles como en este caso, lo es LTE. Después se escoge la herramienta de simulación más apropiada y se elige a la plataforma de simulación OMNeT++ por ser un simulador en tiempo discreto, y que dispone de librerías de todas las tecnologías inalámbricas. Finalmente, se presentaron los tres algoritmos, para después diseñar la red móvil LTE en OMNeT++, se ejecutan las simulaciones y se obtienen los resultados de los escenarios propuestos.

**Palabras claves:** COMUNICACIONES, ARQUITECTURAS, PROTOCOLOS, SIMULADOR, QOS, MÓVIL

## Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.

### 1.1. Introducción.

La evolución a largo plazo (*Long-Term Evolution, LTE*) es un estándar de comunicaciones celulares ampliamente adoptado e implementado en todo el mundo. Ofrece servicios inalámbricos de alta velocidad para satisfacer la creciente demanda del tráfico de datos del usuario. La tecnología LTE también se considera para las redes de seguridad pública. Por lo tanto, es obligatorio asegurarse de que el sistema LTE pueda funcionar en entornos propensos a interferencias, incluida la interferencia dirigida. (Labib et al., 2015)

Para de Andrade et al., (2016) en su publicación indica que las redes celulares de cuarta generación basadas en los estándares LTE y LTE-A son tecnologías clave para la comunicación entre máquinas sin intervención humana. Estas tecnologías abren nuevas oportunidades de negocio para los operadores de redes móviles dado el crecimiento esperado en comunicaciones tipo máquina (*Machine-Type Communications, MTC*) como consecuencia del despliegue cada vez mayor de sensores, teléfonos inteligentes (smartphone) y dispositivos portátiles.

Para Olivera Alonso, (2016) la arquitectura LTE se caracteriza por tres requisitos especiales: soporte solo para dominio de paquetes conmutados (*Packet Switched, PS*), baja latencia (retardo) y costo reducido. Para lograr los objetivos anteriores y superar las complejidades de las arquitecturas de red anteriores, LTE debe estar diseñado para contener menos nodos de red. Esto es importante porque un número menor de nodos de red reduce la cantidad total de procesamiento relacionado con el protocolo, el costo de las pruebas y el número de interfaces.

Sin embargo, la versión avanzada de LTE cumple con los requisitos impuestos por IMT (*International Mobile Telecommunications*) a la Cuarta generación. Con una velocidad de datos máxima de 1 Gbps con ancho de banda operativo de hasta 100 MHz para el enlace descendente, proporciona baja latencia en comparación con LTE. (Kanchi et al., 2013)

## **1.2. Antecedentes.**

Las redes de comunicaciones inalámbricas tanto fijas como móviles son apetecidas por investigadores para el desarrollo de modelados de simulación para telefonía móvil empleando la tecnología LTE. Las herramientas de simulación permiten modelar determinadas redes como en este caso las comunicaciones móviles. En el repositorio digital de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil se encontraron trabajos de titulación relacionados con LTE que fueron presentados para ser profesionales de tercer y cuarto nivel en la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo.

A continuación, se mencionan dos trabajos como antecedente a la presente simulación que es relacionada a la simulación de LTE publicados en el repositorio IEEE:

1. Andreozzi, (2011) publica su trabajo denominado “Evaluación LTE y LTE-Advanced a través de una innovadora herramienta de simulación”. En el cual desarrolló un simulador de nivel de sistema completo para la programación de la activación de enlaces inalámbricos de los nodos de retransmisión.
2. Cox, (2014) en su trabajo denominado “Rendimiento de LTE y LTE-Advanced” realizan las pruebas de sistema LTE en el laboratorio de sistemas de comunicaciones de la Universidad de Dubrovnik con el objetivo de permitir a los estudiantes complementar sus conocimientos teóricos con ejercicios de laboratorio de calidad que van más allá de ejercicios clásicos basados en simulación matemática y programación, al convertir sus ecuaciones y simulaciones de procesamiento de señales directamente en señales de la vida real utilizando el equipo de análisis y generación de señales de última generación.

## **1.3. Definición del problema**

Durante la formación de ingeniero se revisaron los sistemas de comunicaciones móviles LTE sin el empleo de herramientas que permitan al estudiantar revisar parámetros y analizar el comportamiento de este tipo de red. De acuerdo con esto, se requiere la implementación de algoritmos de



medición de calidad de servicio (QoS) para redes LTE utilizando el simulador OMNeT++.

#### **1.4. Justificación del problema a investigar.**

El mayor beneficio de la simulación es que se ahorran tiempo y costos durante la implementación del sistema real porque diseñar, construir, probar, rediseñar, reconstruir, volver a probar, etc. podría ser muy costoso tanto en tiempo como en dinero. Además, la simulación proporciona una comprensión de cómo funcionan realmente los sistemas sin construirlos. Además, las simulaciones son repetibles y se pueden optimizar en cualquier momento para obtener resultados que no son medibles con la tecnología actual.

La simulación es muy versátil y adecuada para aplicaciones en el campo de la ingeniería, física, astrofísica, química, biología, economía, ciencias sociales, capacitación, educación, videojuegos y más. En este documento, solo se tendrá en cuenta la simulación para aplicaciones de calidad de servicio (QoS) en redes móviles LTE.

#### **1.5. Objetivos.**

A continuación, se plantea el objetivo general de la propuesta del trabajo de titulación y los objetivos específicos que se plantean.

##### **1.5.1. Objetivo General.**

Realizar la implementación de algoritmos de medición de calidad de servicio (QoS) para redes LTE utilizando el simulador OMNeT++.

##### **1.5.2. Objetivos específicos.**

- ✓ Describir el estado del arte de los sistemas de comunicaciones móviles LTE.
- ✓ Elaborar los algoritmos de medición de calidad de servicio para tráfico HTTP y de voz utilizando el software OMNeT++
- ✓ Analizar los resultados obtenidos durante la simulación en el programa OMNeT++

## **1.6. Hipótesis**

A través del análisis de tráfico en redes LTE los algoritmos propuestos permitirán obtener mediciones de parámetros de calidad de servicio en la transmisión de información.

## **1.7. Metodología de investigación.**

El presente trabajo de titulación utiliza el diseño de investigación de la simulación. Es decir, que el modelado de simulación de eventos discretos es un método popular para predecir el rendimiento de sistemas complejos, particularmente sistemas que incluyen fenómenos aleatorios. Sin embargo, los proyectos de simulación pueden no alcanzar sus objetivos previstos, a menos que el modelo de simulación se ejerza de manera inteligente para obtener una comprensión útil del rendimiento probable del sistema real.

## Capítulo 2: Conceptos básicos de redes LTE.

### 2.1. Evolución a largo plazo (LTE)

3GPP presenta LTE mediante la "Versión 8 de LTE", también llamada red de acceso terrestre universal evolucionada (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN*) como la parte de acceso del sistema de paquetes evolucionado (EPS). LTE Release 8 es el primer estándar LTE lanzado en diciembre de 2008. Las versiones Release 9, Release 10 y Release 11 de LTE son un paso evolutivo dado a la versión LTE 8. Después de que la organización Release 10 dé un nombre a la tecnología desarrollada como LTE-Advanced.

La razón principal detrás del cambio mundial a la tecnología LTE es su promesa de altas tasas de transferencia de datos del usuario final, baja demora y latencia (retardo), y alta eficiencia espectral. Con LTE, las personas pueden obtener mayores tasas de transferencia de datos de hasta 300 Mbps, con una latencia de menos de 5 milisegundos.

La tecnología de transmisión multiportadora más potente llamada multiplexación por división de frecuencia ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM*) con esquemas de entradas y salidas múltiples (Multiple Inputs Multiple Outputs, MIMO) ha hecho posible esta alta velocidad de transferencia de datos en LTE (Cepeda Cabeza, 2018). La figura 2.1 ilustra la evolución de la red desde el sistema global para móviles (*Global System for Mobile, GSM*) de segunda generación, el servicio general de radio por paquetes (*General Packet Radio Service, GPRS*) de formación intermedia, el Sistema de Comunicación Móvil Universal (UMTS) de tercera generación hasta la Evolución a Largo Plazo (LTE).

De la figura 2.1, se puede ver que GSM está conectado a la caja de interruptores de circuito con enlace azul. Lleva servicios en tiempo real en circuito tradicional conmutado. Los servicios de datos solo están disponibles a través de una conexión de módem con conmutación de circuitos, con velocidades de datos muy bajas. El primer paso hacia una solución de

conmutación de paquetes basada en IP se demuestra mediante el enlace verde que se tomó con la evolución de GSM a GPRS, utilizando la misma interfaz aérea y método de acceso, llamado acceso múltiple por división de tiempo (*Time Division Multiple Access, TDMA*).

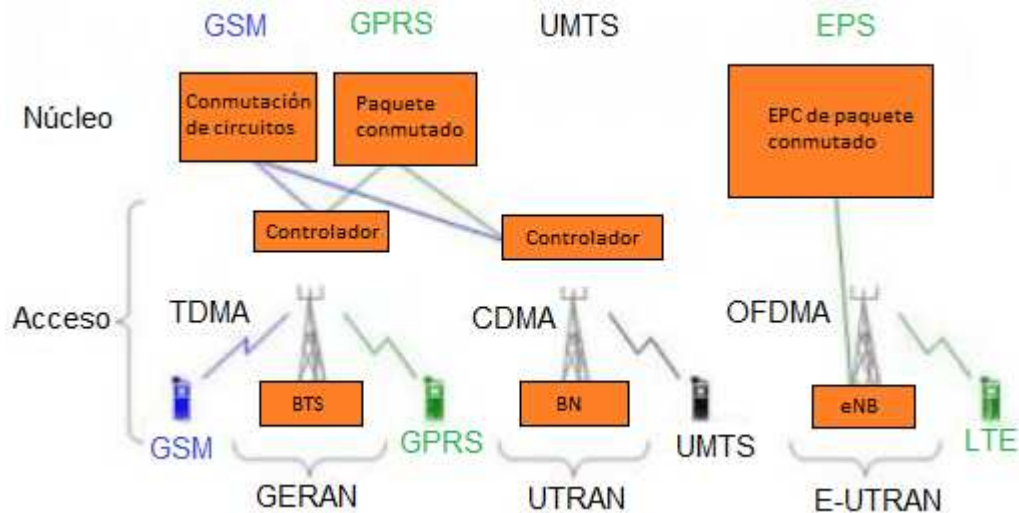


Figura 2. 1: Evolución de la red celular de GSM a LTE.  
Fuente: (3GPP, 2019)

Más tarde, se desarrolló la nueva tecnología de acceso, Acceso múltiple por división de código de banda ancha (*Wideband Code Division Multiple Access WCDMA*), para alcanzar velocidades de datos más altas en la red de tercera generación llamada sistemas universales de telecomunicaciones móviles (*Universal Mobile Telecommunications System, UMTS*). (Villarreal Tercero & Pérez Aguarca, 2015)

La red de acceso en UMTS utiliza conexión de conmutación de circuitos y conmutación de paquetes. Sin embargo, estas conexiones están separadas por la conexión conmutada por circuito para servicios en tiempo real y una conexión conmutada por paquetes para servicios de comunicación de datos. El punto para tener en cuenta es en UMTS, la asignación de la dirección IP del equipo de usuario (*User Equipment, UE*) se lleva a cabo cuando se establece un servicio de comunicación de datos.

Del mismo modo, cuando se lanza el servicio, se libera la dirección IP. Aquí se muestra que los servicios de comunicación de datos todavía están

vinculados al núcleo de conmutación de circuitos para la búsqueda. De manera dispersa, el núcleo evolucionado de paquetes (*Evolved Packet Core, EPC*) está formado exclusivamente por una estructura de protocolo de Internet (*Internet Protocol, IP*) que transporta los servicios de comunicación de datos y en tiempo real. Además, la asignación de la dirección IP del equipo del usuario se ha realizado cuando el móvil está encendido y se libera cuando está apagado.

La nueva solución de acceso, LTE, se basa en el acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA*) que proporciona ortogonalidad entre los usuarios, reduce la interferencia y mejora la capacidad de la red (Bernhardt, 2019). Además, las ventajas son una combinación con una modulación de orden superior (hasta 64 QAM), grandes anchos de banda (hasta 20 MHz) y multiplexación espacial en el enlace descendente (hasta 4x4) que produce una mayor velocidad de datos.

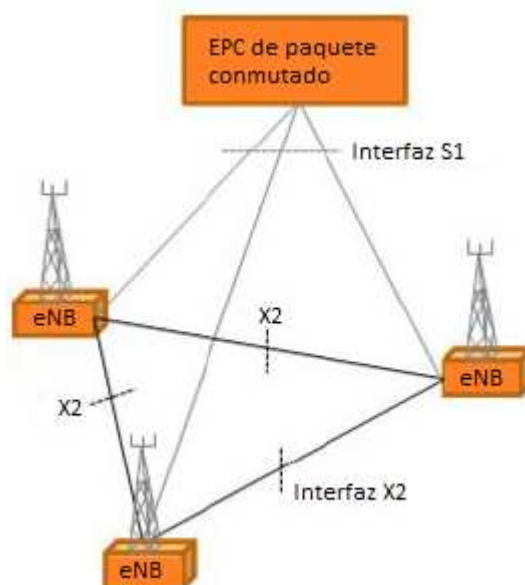


Figura 2. 2: Interfaces S1 y S2 de LTE.  
Fuente: (3GPP, 2019)

La velocidad de datos máxima teórica más alta en el canal de transporte es de 75 Mbps en el enlace ascendente, y en el enlace descendente, usando multiplexación espacial, la velocidad puede ser tan alta como 300 Mbps. La figura 2.2 ilustra la EPC de paquete conmutado, las estaciones base NodeB

evolucionadas (conocida como eNodeB) y las relaciones de interfaz con puertas internas y externas.

Los eNodeBs normalmente están interconectados a través de la interfaz X2. Externamente, estas estaciones base están conectadas a la red central por la interfaz S1. La diferencia notable es que no hay un controlador inteligente centralizado como las tecnologías GSM y UMTS. Dado que la inteligencia del controlador se distribuye entre las estaciones base, se reduce la configuración de la conexión y el tiempo transcurrido para la transferencia.

Para un usuario final, el tiempo de configuración de la conexión para una sesión de datos en tiempo real es crucial en muchos casos, especialmente en los juegos en línea. El tiempo para una transferencia es esencial para los servicios en tiempo real donde los usuarios finales tienden a finalizar las llamadas si la transferencia demora demasiado.

## **2.2. Tecnologías detrás del acceso de radio LTE.**

La figura 2.3 indica la descripción general del acceso por radio LTE desde la versión 8 hasta la versión 10 de que el trabajo inicial en la tecnología LTE se basa en finales de 2004 para proporcionar una nueva tecnología de acceso por radio centrada solo en datos de paquetes conmutados. La primera fase del trabajo de 3GPP en LTE fue definir un conjunto de objetivos de rendimiento y capacidad para LTE. Los objetivos se definen para mantener velocidades de datos máximas, mayor rendimiento del usuario y del sistema, eficiencia espectral y menor latencia. (Dahlman et al., 2011)

Las tecnologías más importantes que trae LTE Release 8 son los esquemas de transmisión, la programación, el soporte de múltiples antenas y la flexibilidad del espectro. Luego, la Versión 8 es seguida por lanzamientos adicionales de LTE como los lanzamientos LTE 9 y 10, que introducen funcionalidades y capacidades adicionales en diferentes áreas como posicionamiento, retransmisión, extensión de antena múltiple, como se ilustra en la figura 2.3.



Figura 2. 3: Descripción general del acceso de radio LTE.

Fuente: (Dahlman et al., 2011)

### 2.3. Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA)

El esquema de transmisión de enlace descendente LTE se basa en OFDMA, que es una tecnología de transmisión multiportadora y de acceso múltiple (Dahlman et al., 2011). El acceso al espectro radioeléctrico se basa en el esquema OFDM. En esta tecnología, los datos completos se dividen en fragmentos más pequeños, y cada fragmento de datos se transmite en paralelo en muchas subportadoras ortogonales de banda estrecha.

OFDM es un caso especial de multiplexación por división de frecuencia (FDM). En FDM, todos los datos se envían en un único operador de banda ancha. La ortogonalidad de las subportadoras es muy importante en esta técnica de transmisión. Si las subportadoras no son ortogonales entre sí, esto causa interferencia entre portadoras. Las subportadoras ortogonales se muestran en la figura 2.4.

Cada subportadora puede modularse con diferentes técnicas de modulación en paralelo, dependiendo de la condición del canal de la subportadora particular. La subportadora que tiene una buena condición de canal puede optar por una modulación de orden superior, como la modulación de amplitud de 64 cuadraturas (64-QAM), mientras que la subportadora que tiene una mala condición de canal debe adaptarse a QAM.

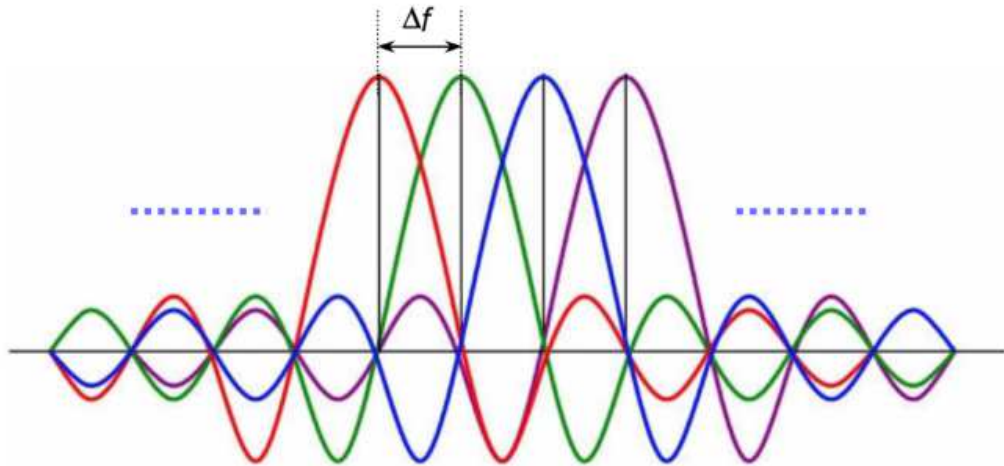


Figura 2. 4: Subportadoras OFDM.  
Fuente: (Revolution Wi-Fi, 2015)

La principal ventaja de la modulación OFDM es su buen rendimiento en canales selectivos de frecuencia. Si un canal tiene desvanecimientos profundos en algunas frecuencias, solo se ven afectadas las subportadoras correspondientes. También facilita la ecualización del canal en el lado del receptor, donde se puede implementar la ecualización del dominio de frecuencia. Además, la inserción del prefijo cíclico lo hace robusto contra el retraso de la difusión de la señal.

OFDM también proporciona algunos beneficios adicionales relevantes para LTE:

- OFDM es un habilitador clave para proporcionar operación en el dominio de la frecuencia que permite que el planificador dependiente del canal funcione en comparación con la programación del dominio del tiempo utilizada solo en los principales sistemas 3G.
- Desde una perspectiva de banda base, se utiliza un número variable de subportadoras OFDM para la transmisión. Significa que el ancho de banda de transmisión es lo suficientemente flexible como para soportar la operación en asignaciones de espectro de diferente tamaño.
- Además, para la transmisión de difusión o multidifusión, OFDM proporciona que la misma información se transmita desde múltiples estaciones base.



## 2.4. Programación dependiente del canal

El uso de OFDM en la capa física de LTE proporciona que el planificador pueda operar con los dominios de tiempo y frecuencia. Esto significa que el planificador puede seleccionar usuarios con las mejores condiciones de canal para cada región de frecuencia y de instante de tiempo. La ventaja es que el programador puede programar un terminal teniendo en cuenta el canal en el dominio del tiempo y la frecuencia. Esta es una de las principales características de LTE. La figura 2.5 muestra la programación del enlace descendente en los dominios de tiempo y frecuencia.

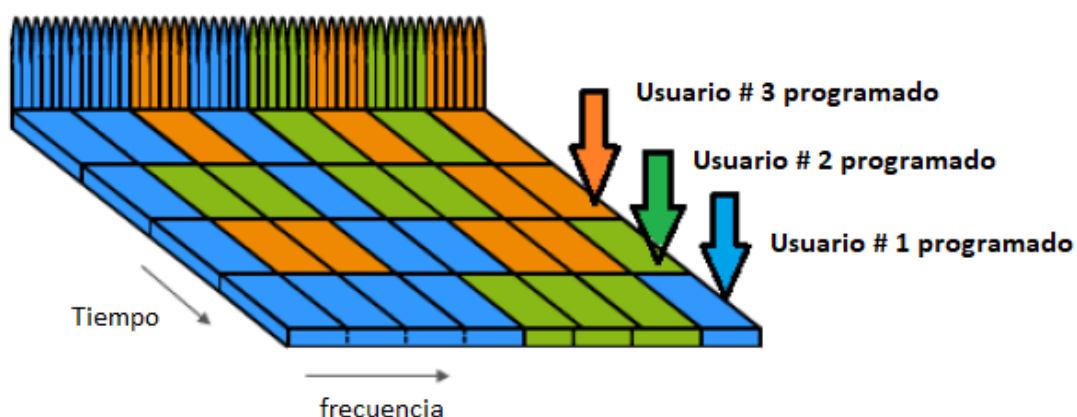


Figura 2. 5: Programación de enlace descendente en dominios de tiempo y frecuencia.

Fuente: (Telecom Engineer, 2018)

La programación dependiente del canal en un sistema de comunicación móvil aborda la cuestión de cómo compartir, entre diferentes usuarios (diferentes terminales), los recursos de radio disponibles en el sistema para lograr una utilización de recursos lo más eficiente posible. Por lo general, esto implica minimizar la cantidad de recursos necesarios por usuario y, por lo tanto, permitir la mayor cantidad posible de usuarios en el sistema, al tiempo que se satisfacen sus requisitos de QoS.

De acuerdo con las condiciones del canal, el planificador puede determinar cuántos bloques de recursos deben asignarse a un usuario y qué intervalo de tiempo y banda de frecuencia deben usarse. Además, en cuanto a la condición del canal, el planificador también puede decidir qué velocidad de datos debe usar el terminal para transferir datos. Las mejores condiciones del canal permiten utilizar velocidades de datos más altas.

La programación dependiente del canal depende de las variaciones de calidad del canal entre los usuarios para obtener una ganancia en la capacidad del sistema. La programación del dominio de frecuencia es adecuada cuando el canal varía lentamente en el tiempo. Sin embargo, para los servicios sensibles al retraso, el planificador de dominio de tiempo ayuda a programar un usuario en particular. Para LTE, las decisiones de programación se pueden tomar tan a menudo como una vez cada 1 ms y la granularidad en el dominio de frecuencia es de 180 kHz. Esto permite variaciones de canal relativamente rápidas en los dominios de tiempo y frecuencia que el planificador debe seguir y utilizar.

Para admitir la programación de enlace descendente, los equipos de usuario proporcionan informes de calidad del canal de red instantáneamente en los dominios de tiempo y frecuencia. Los informes de estado del canal se obtienen midiendo las señales de referencia transmitidas en el enlace descendente. Según estos informes, el programador de enlace descendente puede asignar recursos para la transmisión de enlace descendente a diferentes usuarios considerando la calidad del canal en la decisión de programación. En principio, a un usuario programado se le puede asignar una combinación arbitraria de bloques de recursos de 180 kHz de ancho en cada intervalo de programación de 1 ms.

## **2.5. Ancho de banda y flexibilidad de espectro**

La flexibilidad del ancho de banda es una característica importante de LTE que proporciona diferentes anchos de banda de transmisión en el enlace descendente y el enlace ascendente. Significa que las implementaciones de LTE pueden variar entre diferentes bandas de frecuencia que permiten operar en diferentes espectros que son espectro emparejado y no emparejado al admitir tanto Duplexación por división de frecuencia (FDD) como Duplexación por división de tiempo (TDD) como se muestra en la figura 2.6.

El uso de OFDM ofrece la posibilidad de programación de canales dependiente de la frecuencia y asignación dinámica del ancho de banda de

transmisión. La asignación de ancho de banda se realiza en términos de bloques de recursos (RB).

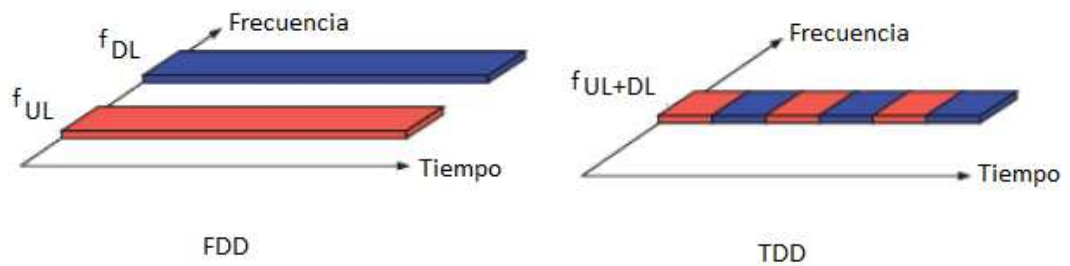


Figura 2. 6: División de frecuencia y tiempo dúplex.  
Fuente: (Yonis et al., 2012)

La tabla 2.1 indica el ancho de banda del canal LTE disponible que varía desde 1.4 MHz hasta alrededor de 20 MHz y el número correspondiente de bloques de recursos.

Tabla 2. 1: Relación entre el ancho de banda del canal, los bloques de recursos correspondientes.

Ancho de banda del canal (MHz)	Cantidad de bloques de recursos
1.4	6
3	15
5	25
10	50
15	75
20	100

Fuente: (Yonis et al., 2012)

## 2.6. Informes de indicadores de calidad de canal (CQI) y la modulación y codificación adaptativa (AMC)

El procedimiento de notificación del indicador de calidad del canal (*Channel Quality Indicator, CQI*) es una característica fundamental de las redes LTE, ya que permite la estimación de la calidad del canal de enlace descendente en el eNodeB. Cada CQI se calcula como una medida cuantificada y escalada de la relación señal/interferencia más ruido (*Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR*) experimentada. El principal problema relacionado con los métodos de informes CQI es encontrar un buen equilibrio

entre una estimación precisa de la calidad del canal y una sobrecarga de señalización reducida.

El procedimiento de informe CQI está estrictamente relacionado con el módulo de Modulación y Codificación Adaptativa (*Adaptive Modulation and Coding, AMC*), que selecciona el esquema de modulación y codificación adecuado (*Modulation and Coding Scheme, MCS*) que intenta maximizar el rendimiento admitido con una tasa de error de bloque (*Block Error Rate, BLER*) objetivo. De esta manera, un usuario que experimente una SINR más alta será atendido con tasas de bits más altas, mientras que un usuario de borde de celda o, en general, un usuario que experimente malas condiciones de canal mantendrá conexiones activas, pero a costa de un rendimiento más bajo.

## **2.7. Solicitud de repetición automática híbrido (HARQ).**

HARQ es una combinación de solicitud de repetición automática (*Automatic Repeat reQuest, ARQ*) y de la corrección de errores de reenvío (*Forward Error Correction, FEC*). ARQ se utiliza para fines de retransmisión, en los que el receptor envía “Confirmado” (ACK) o “No reconocido” (NACK) correspondiente al mensaje correcto o incorrecto que recibe.

El receptor utiliza la verificación de redundancia cíclica (*Cyclic Redundancy Check, CRC*) para verificar la responsabilidad del mensaje recibido. El terminal puede corregir algunos mensajes erróneos. Para la corrección, utiliza algunos códigos de corrección de errores de reenvío (FEC), como los códigos Turbo.

Además, el receptor combina los mensajes erróneos recibidos previamente mientras retransmite los mensajes nuevos. El proceso se llama combinación suave. Con una combinación suave, la energía por bit del mensaje recibido se puede incrementar. La retransmisión se lleva a cabo en dos niveles en LTE que son la retransmisión de nivel de Control de enlace de radio (RLC) y la retransmisión de nivel de Control de acceso medio (MAC). Solo la capa MAC admite HARQ; la capa RLC solo admite ARQ.

## 2.8. Arquitectura del sistema LTE

3GPP estandariza LTE con dos partes formadas con acceso de radio y red central que se llaman LTE RAN (LTE-Radio Access Network) y EPC (Evolved Packet Core) respectivamente, tal como se muestra en la Figura 2.7. La LTE RAN es responsable de todas las funciones relacionadas con la radio de la red en general, incluida, por ejemplo, la programación, el manejo de los recursos de radio, los protocolos de retransmisión, la codificación y varios esquemas de múltiples antenas.

Además, el EPC es responsable de las funciones no relacionadas con la interfaz de radio, pero necesarias para proporcionar una red de banda ancha móvil completa. Esto incluye, por ejemplo, autenticación, funcionalidad de carga y configuración de conexiones de extremo a extremo. Manejar estas funciones por separado, en lugar de integrarlas en la RAN, es beneficioso ya que permite que varias tecnologías de acceso por radio sean atendidas por la misma red central.

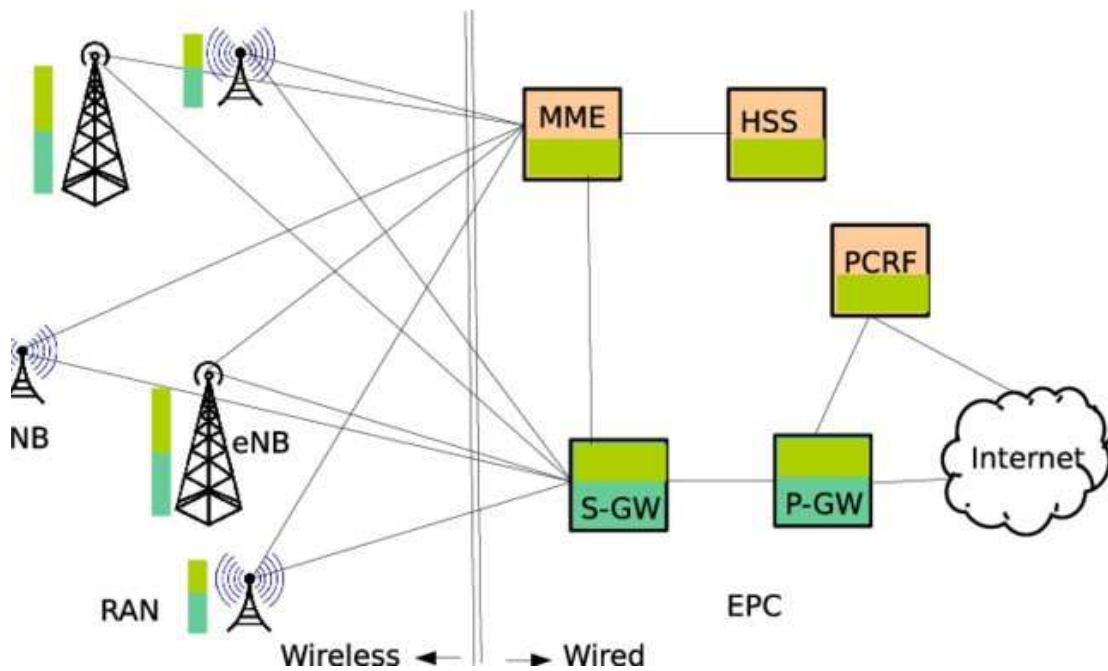


Figura 2. 7: LTE RAN - Arquitectura EPC.

Fuente: (Zaidi et al., 2018)

Sin embargo, dado que este trabajo de titulación se relacionó con la programación consciente de calidad de servicio (QoS) basada en el lado de acceso de radio de la red LTE, a continuación, se explican principalmente los

protocolos de enlace descendente de acceso de radio, flujos de tráfico y modelos de programación.

### 2.8.1. Protocolos de acceso por radio

La figura 2.8 muestra la arquitectura del protocolo de radio para el caso de enlace descendente LTE. Para los paquetes IP proporcionados por RAN, el protocolo de conversión de datos en paquetes (*Packet Data Conversion Protocol, PDCP*) agrega un encabezado a los paquetes para la entrega en secuencia, y también aplica un algoritmo de compresión de encabezado para reducir los gastos generales. PDCP también hace la encriptación de los datos.

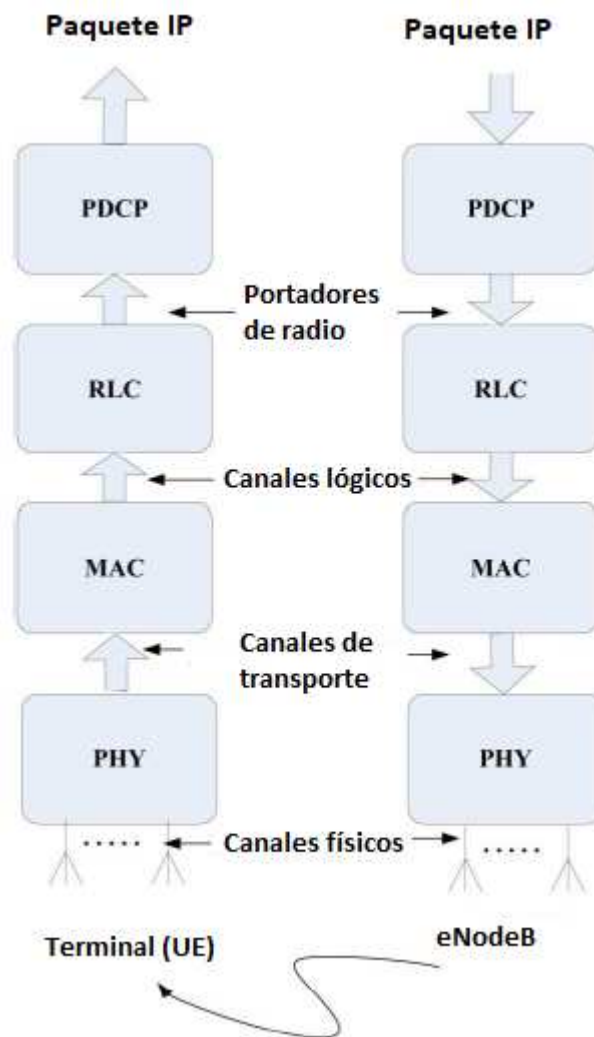


Figura 2. 8: Flujo de capa de enlace descendente LTE.  
Elaborado por: Autor

El control de enlace de radio (*Radio Link Control, RLC*) realiza la segmentación de los paquetes que le pasa PDCP. Su responsabilidad

también incluye el manejo de retransmisión simple (no es compatible con HARQ) y la entrega en secuencia de los paquetes. El RLC proporciona servicios al PDCP en forma de portadores de radio. HARQ reside en la capa MAC. La programación se maneja en esta capa. El MAC proporciona servicios al RLC en forma de canales lógicos.

PHY (capa física) es la capa más baja en la arquitectura del protocolo. Su principal responsabilidad es manejar la codificación, la modulación y el mapeo de antenas. El PHY proporciona servicios al MAC en forma de canales de transporte. Las diferentes capas en el lado del receptor invierten el proceso realizado por las capas correspondientes en el transmisor.

Por ejemplo, las funciones de la capa PHY en el lado del receptor son el mapeo, la demodulación y la decodificación para enumerar diferentes tipos de canales en diferentes capas de protocolo de LTE, tanto en las direcciones de enlace ascendente como de enlace descendente. Además, la Tabla 2.2 incluye los canales relacionados para los canales lógicos, de transporte y físicos en ambas direcciones. Sin embargo, este trabajo de titulación se basa principalmente en la capa MAC.

Tabla 2. 2: Tipos de canales LTE.

	Canales de enlace descendente LTE	Canales de enlace ascendente LTE
Canales lógicos	PCCH, BCCH, CCCH, DTCH, DCCH, MTCH, MCCH	CCCH, DTCH, DCCH
Canales de transporte	PCH, BCH, DL-SCH, MCH	UL-SCH, RACH
Canales físicos	PBCH, PDSCH, PDCCH, PHICH, PCFICH, PMCH	PUSCH, PUCCH, PRACH

Fuente: (Monem, 2017)

### 2.8.2. Capa MAC

En esta sección se explica la capa MAC y su estado de trabajo para la programación. La capa MAC funciona principalmente en la multiplexación de

canales lógicos, retransmisiones HARQ y programación de enlace ascendente y descendente. La funcionalidad de programación del MAC tiene un papel importante para este trabajo de titulación que se encuentra en el eNodeB para ambos canales de enlace ascendente y enlace descendente. Además, la parte del protocolo HARQ de la capa MAC presenta los extremos de transmisión y recepción del protocolo MAC. Después del procesamiento de datos en la capa MAC, MAC proporciona servicios al RLC en forma de canales lógicos.

Dentro del eNodeB, MAC es responsable de la multiplexación de diferentes canales lógicos y su asignación a los canales de transporte apropiados. Además de la multiplexación de diferentes canales lógicos, la capa MAC también puede insertar los elementos de control MAC en los bloques de transporte que se transmitirán a través de los canales de transporte. El elemento de control MAC se utiliza para la señalización de control en banda, por ejemplo, comandos de avance de temporización y respuesta de acceso aleatorio.

Como se puede ver en la Figura 2.9, estos elementos de control se identifican con valores reservados en el campo Índice de canal lógico (LCID), donde el valor de LCID indica el tipo de información de control. El campo LCID en uno de los subtítulos MAC se establece en un valor reservado que indica la presencia de un informe de estado del búfer. Desde una perspectiva de programación, la información del búfer para cada canal lógico es beneficiosa.

El campo de tamaño de la memoria intermedia en un informe de estado de la memoria intermedia indica la cantidad de datos que esperan la transmisión a través de todos los canales lógicos en un grupo de canales lógicos. El informe de estado del búfer se puede activar periódicamente cuando la llegada de datos tiene mayor prioridad que la que está actualmente en el búfer de transmisión. Este proceso afecta la decisión de programación. En segundo lugar, si el usuario comienza a ser atendido por otra celda, el informe de estado del búfer proporcionará información sobre la nueva celda y la situación del usuario.



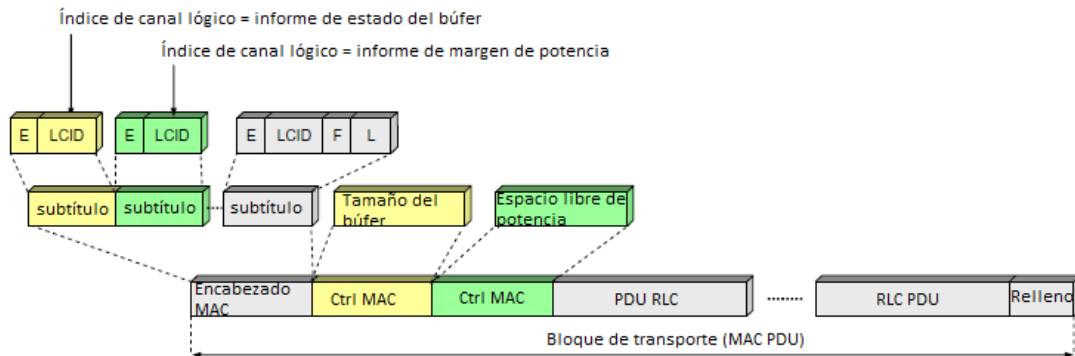


Figura 2. 9: Informes de estado del bloque de transporte.  
Fuente: (Dahlman et al., 2016)

Desde la capa física, la capa MAC utiliza servicios en forma de canales de transporte. Un canal de transporte muestra las características de la información durante la transmisión a través de la interfaz de radio. Esta información sobre un canal de transporte está organizada en bloques de transporte. En cada intervalo de tiempo de transmisión (TTI), como máximo se transmite un bloque de transporte a través de la interfaz de radio desde un terminal en ausencia de multiplexación espacial.

En el caso de multiplexación espacial (MIMO), puede haber hasta dos bloques de transporte por TTI. El formato de transporte que se define para cada bloque de transporte incluye información sobre el tamaño del bloque de transporte, el esquema de modulación y codificación, y el mapeo de la antena. Al variar el formato de transporte, la capa MAC puede obtener diferentes velocidades de datos. Por lo tanto, el control de velocidad también se conoce como selección de formato de transporte. La capa MAC en la capa de enlace de datos de Interconexión de sistema abierto (OSI) tiene como objetivo controlar la autoridad del usuario sobre el acceso a los medios y recursos.

El programador es un problema importante en la capa MAC para que el rendimiento del sistema pueda mejorarse mediante un algoritmo de programación eficiente para asignar la prioridad de cada usuario. Por esta razón, el planificador en la capa MAC es el factor principal para afectar el rendimiento del sistema y la reutilización de recursos.

### 2.8.3. Estructura de trama de enlace descendente

En la transmisión LTE, los recursos de radio físicos se asignan al dominio de tiempo y frecuencia. En el dominio de frecuencia, la red LTE explota OFDMA en el enlace descendente que proporciona el uso de subportadoras de banda estrecha distribuidas en todo el espectro. LTE es una interfaz de radio flexible que utiliza anchos de banda variables que van desde 1,4 MHz a 20 MHz que ofrece velocidades de datos más altas.

En el dominio del tiempo, el tiempo se divide en cuadros y subtramas que cada subtrama es de 1 ms. Luego, cada subtrama se divide en dos ranuras cada una de 0,5 ms, lo que hace que el tiempo total para una trama sea equivalente a 10 ms. Cada intervalo de tiempo en el sistema de enlace descendente LTE consta de 7 símbolos OFDM. Los recursos físicos del enlace descendente LTE se pueden ilustrar utilizando una cuadrícula de recursos de frecuencia-tiempo, tal como se muestra en la figura 2.10.

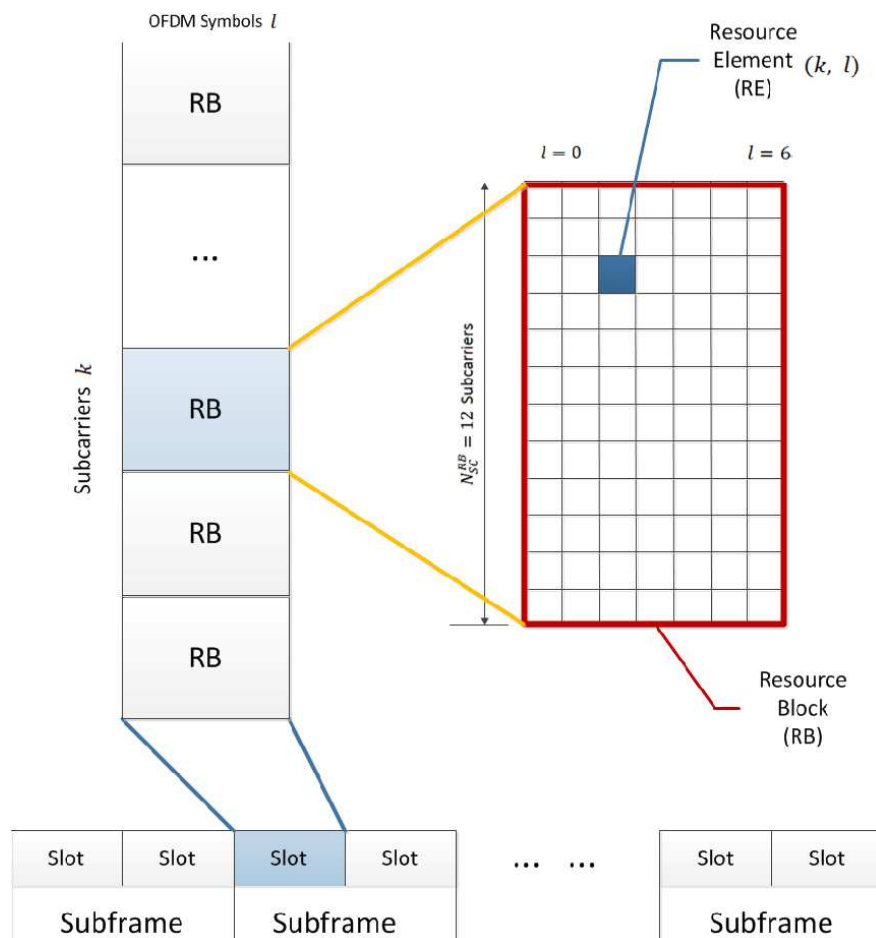


Figura 2. 10: Estructura de trama de enlace descendente LTE.

Fuente: (Dahlman et al., 2016)

- 1 elemento de recurso (RE) = 1 subportadora durante 1 símbolo OFDM
- 12 símbolo OFDM x 15 kHz = 180 kHz
- 180 kHz x 0.5 ms = 1 RB (bloque de recursos)
- 180 kHz x 1 ms = 2 RB (bloque de programación)

En la figura 2.11, se ilustra la estructura de trama de ranura de la red LTE.

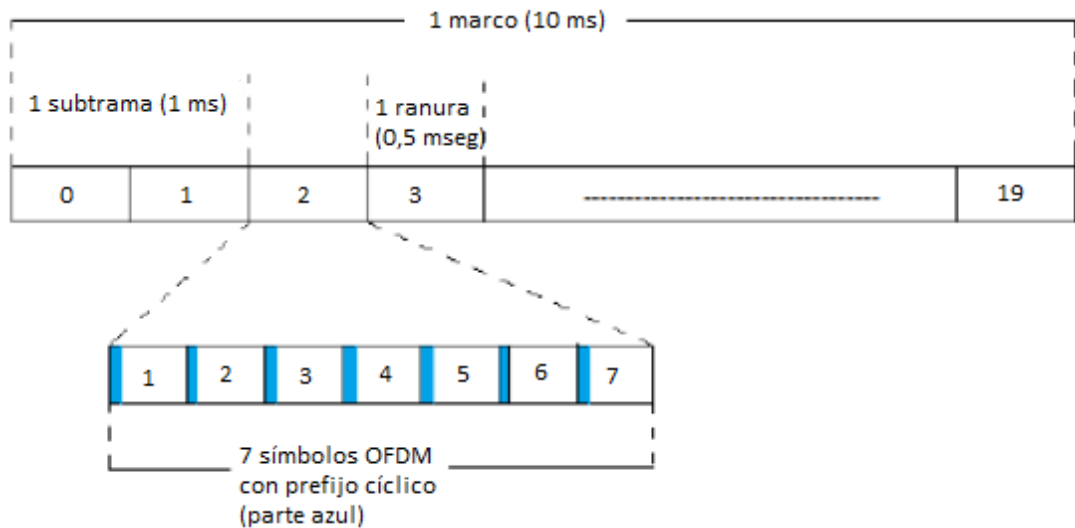


Figura 2. 11: Tramado LTE - Estructura de ranura.  
Fuente: (Dahlman et al., 2016)

En la red LTE, un bloque de recursos (RB), que es la unidad de recursos mínima asignada al Equipo de usuario (UE), corresponde al ancho de banda de 180 kHz en el dominio de frecuencia y 0,5 ms en el dominio de tiempo. En este contexto, el planificador se convierte en el elemento clave que se encuentra en la estación base y asigna el bloque de recursos a los terminales. El planificador determina para cada subtrama de 1 ms qué usuario (s) puede transmitir y en qué recursos se asignan.

Para mantener la ortogonalidad de las subportadoras, el período de guarda se genera como un prefijo cíclico (CP), repitiendo algunas muestras desde el final de cada símbolo al principio, tal como se muestra en la Figura 2.12. Según el ancho de banda elegido de 1.4Mhz a 20MHz, el número de RB disponibles varía de 6 a 100 respectivamente. Es sencillo ver que cada RB tiene 84 elementos de recursos en el caso del prefijo cíclico normal y 72 elementos de recursos en el caso del prefijo cíclico extendido.

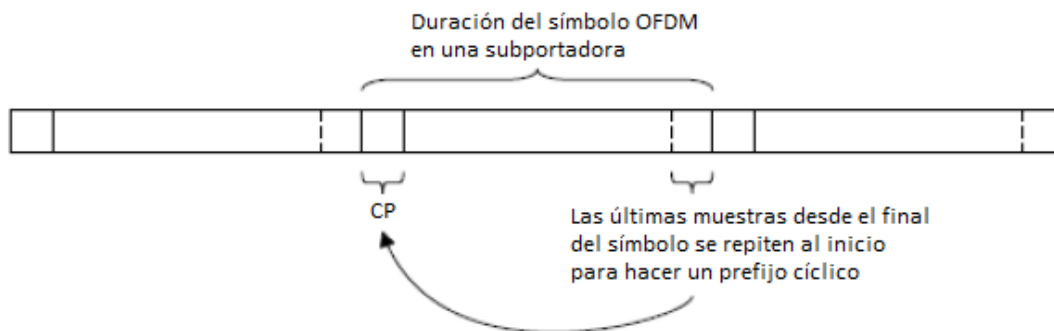


Figura 2. 12: Prefijo del ciclo del período de guardia.  
Fuente: (Dahlman et al., 2016)

#### 2.8.4. Asignación de recursos

En el proceso de programación, la selección de los esquemas de modulación y codificación (MCS) es un tema clave. En el enlace descendente LTE, la técnica de Modulación Adaptativa y Codificación (AMC) se utiliza para seleccionar un nivel MCS apropiado para la transmisión del UE de acuerdo con el estado o condición del canal del usuario.

En primer lugar, el UE estima la condición instantánea del canal para determinar el índice del Indicador de calidad del canal (CQI). Luego, UE envía este informe CQI como una retroalimentación al eNodeB. En consecuencia, eNodeB usa este índice CQI para elegir un cierto nivel de MCS y asigna pares de bloques de recursos de acuerdo con el UE. La relación entre el índice CQI y el MCS se muestra en la Tabla 2.3, donde los índices CQI más grandes representan niveles más altos de MCS. Además, la tabla muestra un uso más eficiente de los recursos del canal y menos pares de bloques de recursos ocupados para la transmisión.

Sin embargo, las diferencias en las tasas de modulación y codificación producen diferentes rendimientos de la tasa de error de bloque (BLER). La relación entre la señal a la relación de ruido (SNR) y las curvas BLER de cada índice CQI se estudiaron ampliamente en la literatura, lo que indica claramente que CQI es un reflejo de la calidad del canal como SNR, donde un CQI alto refleja una buena condición del canal, bajo el cual se podría seleccionar un alto nivel de MCS para lograr una alta tasa de bits y eficiencia.

Tabla 2. 3: Mapeo de valores CQI versus MCS.

Índice CQI	Modulación	Tasa de código x 1024	Eficiencia	Índice CQI	Modulación	Tasa de código x 1024	Eficiencia
0	Fuera de rango			8	16QAM	490	1.914
1	QPSK	78	0.152	9	16QAM	616	2.406
2	QPSK	120	0.234	10	16QAM	466	2.730
3	QPSK	193	0.377	11	64QAM	567	3.322
4	QPSK	308	0.602	12	64QAM	666	3.902
5	QPSK	449	0.877	13	64QAM	772	4.523
6	QPSK	602	1.176	14	64QAM	873	5.115
7	16QAM	378	1.477	15	64QAM	948	5.554

Fuente: (Dahlman et al., 2016)

La figura 2.13 representa los principales módulos de asignación de recursos que interactúan con el programador de paquetes de enlace descendente.

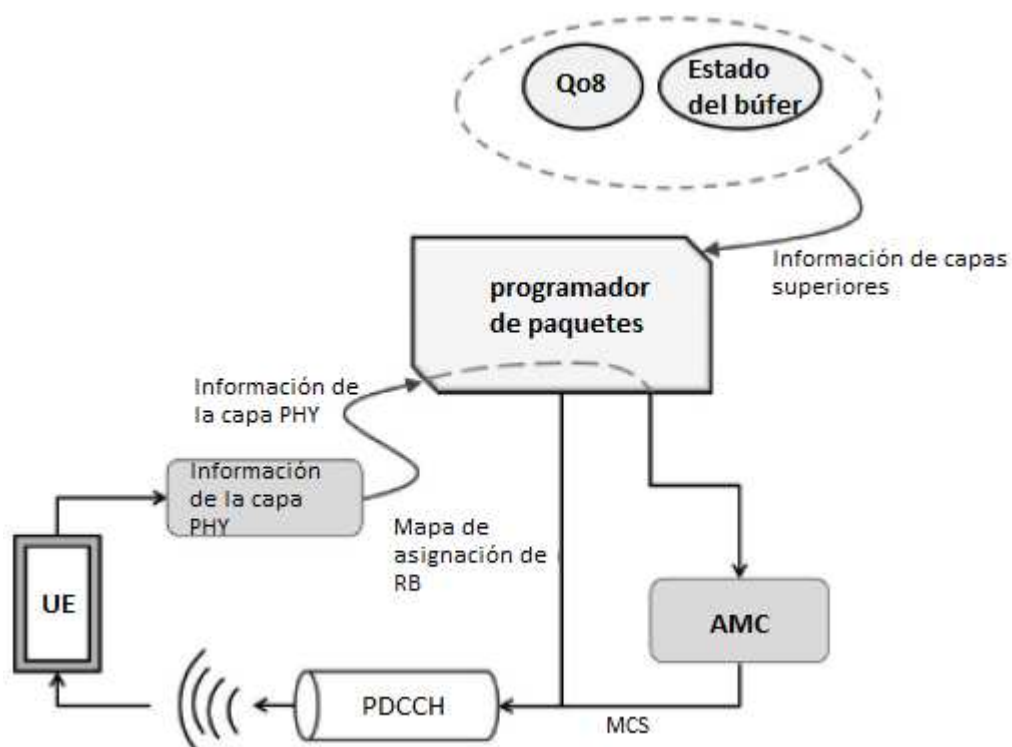


Figura 2. 13: Modelo simplificado de asignación de recursos.

Elaborado por: Autor

Todo el proceso que se muestra en la Figura 2.13 se repite en cada TTI. El paso inicial de cada UE decodifica las señales de referencia, calcula el CQI. El UE envía esta información CQI como retroalimentación al eNodeB. En

segundo lugar, eNodeB utiliza la información de CQI para las decisiones de asignación. A partir de entonces, el módulo AMC selecciona el mejor MCS.

Esta información sobre estos usuarios, que son la asignación de RB y la selección de MCS, se envían a los UE en el canal de control de enlace descendente físico (PDCCH). Luego, cada UE lee la carga útil de PDCCH y, en caso de que se haya programado, accede a la carga útil adecuada del canal compartido de enlace descendente físico (PDSCH).

## **2.9. Programación de algoritmos.**

En las redes LTE, una programación dinámica es un proceso clave para proporcionar un uso eficiente de recursos limitados con el costo más bajo. Un bloque de recursos (RB), que es la unidad mínima asignada a los terminales, corresponde al ancho de banda de 180 kHz en el dominio de la frecuencia y 0,5 ms en el dominio del tiempo. Para la dirección del enlace descendente, si el ancho de banda es de 20 MHz, hay 100 RB disponibles en el sistema. Cuando hay 50 usuarios activos, hay  $100^{50}$  asignaciones diferentes de RB a UE. Esta gran posibilidad muestra la importancia y la capacidad del planificador. Especialmente para redes altamente cargadas, el planificador puede afectar significativamente el rendimiento del sistema.

También se sabe que la característica clave de la comunicación por radio móvil son los cambios rápidos y significativos en las condiciones del canal debido al sombreado, el desvanecimiento rápido, la trayectoria múltiple, etc. Estas variaciones instantáneas y aleatorias afectan la calidad de cada canal de radio en una celda. Por lo tanto, los cambios en los canales deben tenerse en cuenta cuando se realiza la programación. Por lo tanto, el objetivo en este trabajo de titulación es proponer un nuevo planificador para maximizar el rendimiento de la red.

La programación controla la asignación de recursos compartidos entre los usuarios en cada constante de tiempo. En LTE, para cada intervalo de tiempo de transmisión (TTI) de 1 ms, el planificador determina qué usuario (s) puede transmitir y qué recursos se asignan. Después de la programación, se

enviará un mapa de programación a todas las terminales. El terminal individual solo decodifica los datos recibidos en cierto tiempo y frecuencia particulares según el mapa de programación. Al recibir periódicamente la información de retroalimentación de los terminales, el planificador en la estación base ajusta dinámicamente las decisiones de programación para garantizar la asignación eficiente de recursos y los requisitos de calidad de servicio.

En general, la programación se puede dividir en dos clases: programación independiente del canal y programación dependiente del canal. La programación independiente del canal no tiene en cuenta las condiciones del canal. Por el contrario, la programación dependiente del canal se realiza mediante la asignación de recursos en función de las condiciones del canal. Se trata de cómo compartir los recursos de radio disponibles entre diferentes terminales para lograr la utilización eficiente de los recursos posible. Esto implica minimizar la cantidad de recursos necesarios por usuario mientras se satisfacen los requisitos de calidad de servicio. Por lo tanto, tantos usuarios como sea posible en el sistema pueden usar los recursos.

Además, la programación se puede clasificar según los escenarios de aplicación, ya que el rendimiento de los algoritmos de programación depende en gran medida del tipo de flujos entrantes. Para lograr un rendimiento específico de la aplicación, es importante seleccionar algoritmos adecuados de acuerdo con los tipos de flujos de tráfico que se pueden dividir en tiempo real y no en tiempo real considerando los servicios LTE, que incluyen voz, datos y video.

En este capítulo, los algoritmos de programación existentes que consideran los tipos de tráfico y las cualidades del canal se explican a continuación junto con sus ideas principales. A continuación, el Capítulo 3 representa los algoritmos propuestos que se centran en la programación dependiente del canal para lograr un mejor rendimiento en la asignación de recursos entre usuarios en tiempo real y no real.

## **2.10. Algoritmos de programación en tiempo no real**

Un planificador de paquetes realiza su decisión de asignación para maximizar el nivel de satisfacción de los requisitos del sistema. Un planificador mide la satisfacción del sistema en función de una métrica de rendimiento deseable, como la velocidad de datos experimentada del equipo de usuario (UE), la imparcialidad en la asignación de recursos entre los UEs, el retardo promedio de paquetes experimentado por los UEs, entre otros. La elección de qué métrica de rendimiento optimizar la forma en que el planificador resuelve el recurso de contención entre UEs.

En general, los algoritmos de programación tienen como objetivo proporcionar un intercambio eficiente de recursos, un mejor rendimiento en términos de retraso, rendimiento, utilización de enlaces, equidad, complejidad, etc. El programador busca la solución óptima o subóptima de las funciones anteriores, mientras considera la sobrecarga de cómputo.

Los algoritmos de programación más populares para flujos en tiempo no real en redes LTE son la planificación Round-Robin, MaxC/I y equidad proporcional (*Proportional Fair, PF*). El rendimiento de los algoritmos de tiempo no real se mide con rendimiento y equidad.



## Capítulo 3: Desarrollo de la propuesta.

### 3.1. Propuesta de algoritmos de programación.

La tarea de un planificador en una estación base LTE es asignar bloques de recursos físicos disponibles a los usuarios. Este proceso de asignación se lleva a cabo dentro del Nodo B evolucionado (eNodeB) en la arquitectura de red LTE. Un eNodeB incluye las funcionalidades tanto del controlador de estación base (*Base Station Controller, BSC*) como del controlador de red de radio (*Radio Network Controller, RNC*) que eran dos entidades distintas en la arquitectura de red celular tradicional.

La tarea de asignación de recursos de radio, que distribuye los recursos de radio disponibles a los UE, se lleva a cabo dentro de eNodeB. Ninguno de los algoritmos de programación estándar existentes, como Round Robin, MaxC/I y Proportional Fair, tiene en cuenta las cualidades del canal y los tipos de tráfico al mismo tiempo cuando los recursos disponibles se asignan a los UE.

Por ejemplo, el planificador MaxCQI asigna bloques de recursos (RB) a los UEs utilizando únicamente la información del indicador de calidad del canal (CQI) sin tener en cuenta los requisitos de calidad de servicio (Quality of Service, QoS) de los UEs. Estos programadores tampoco proporcionan ningún instrumento para influir en la operación de programación de acuerdo con las condiciones cambiantes de la red.

Una red autoorganización (*Self-Organizing Network, SON*) es un tipo de red que optimiza los parámetros del sistema tanto en la fase de implementación (etapa de planificación) como también con respecto a las condiciones cambiantes de la red durante el tiempo de ejecución (por ejemplo, cambios en la demanda de tráfico, cualidades del enlace inalámbrico, ubicaciones de usuarios, etc.). Una función de la red autoorganizada para la red LTE se puede realizar en dos pasos:

- (i) extender los algoritmos de programación LTE existentes para hacerlos reconfigurables a diferentes condiciones de red

- (ii) reconfiguración de los parámetros de programación LTE cuando cambian las condiciones de la red.

En el presente trabajo de titulación, se proponen tres algoritmos de programación de enlace descendente LTE, teniendo en cuenta las cualidades del canal y los tipos de tráfico de los UEs, para realizar el primer paso de la función de una red autoorganizada. Un parámetro reconfigurable en los planificadores propuestos determina el nivel de priorización de recursos para servicios en tiempo real y, por lo tanto, permite a los administradores de red controlar de manera más efectiva la asignación de recursos de acuerdo con los requisitos de QoS, como el rendimiento, la pérdida de paquetes, el retardo y la equidad de los UE y el cambio de red dinámico.

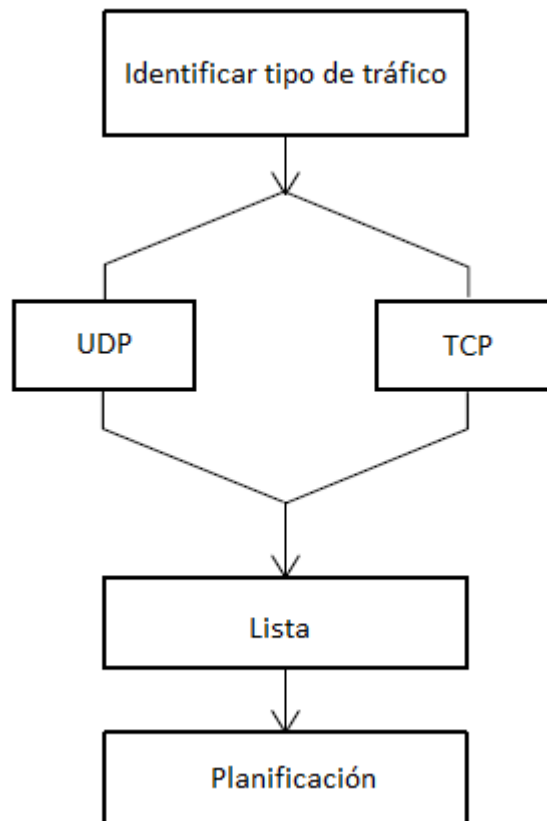


Figura 3. 1: Diagrama de flujo del algoritmo de programación.  
Elaborado por: Autor

La figura 3.1 muestra el diseño del diagrama de flujo de alto nivel para crear los tres algoritmos de programación. Primero, el tráfico entrante se clasifica en flujos en tiempo real y tiempo no real. Los UEs activos, que

necesitan un bloque de recursos, se insertan en una lista de prioridades. Las prioridades se determinan utilizando el tipo de tráfico y la información de calidad del canal de los UEs. Por ejemplo, el tráfico en tiempo real tiene una prioridad estricta sobre el tráfico en tiempo no real en una variante de los algoritmos de programación propuestos. Finalmente, el planificador asigna bloques de recursos disponibles a los usuarios de acuerdo con el orden en la lista de prioridades.

La figura 3.2 muestra el primer algoritmo propuesto. El usuario de tráfico entrante se inserta en la lista de prioridades utilizando el tipo de tráfico (en tiempo real o no real) y la información de calidad del canal. Es decir, que todos los flujos en tiempo real tienen mayor prioridad que los flujos en tiempo no real y, por lo tanto, el tipo de tráfico es el factor más importante para determinar el punto de inserción del tráfico entrante en la lista de prioridades.

```

N = Número de UEs;
CQIi = Indicador de calidad del canal para UE i;
Ti = Tipo de tráfico para UE i;
RB = Bloque de recursos disponibles;
L = Lista de prioridades para la asignación de RB;
inicializar L
for i = 1 a N
if (Ti == UDP)
add UE i a la parte superior de L,
el punto de inserción a L está determinado por CQIi
else if (Ti == TCP)
add UE i a la parte inferior de L,
el punto de inserción a L está determinado por CQIi
allocate RBs a UEs de acuerdo con el orden en L

```

Figura 3. 2: Pseudocódigo del primer algoritmo.

Elaborado por: Autor

Se conjetura que el primer algoritmo (ver figura 3.2) maximiza el rendimiento del tráfico en tiempo real al proporcionar un mayor rendimiento, menores tasas de pérdida y menor retardo de extremo a extremo, mientras que el rendimiento del tráfico en tiempo no real se degrada significativamente.

La figura 3.3 muestra segundo algoritmo propuesto, que es una versión mejorada del primer algoritmo en el sentido de que el administrador de la red pueda controlar la compensación entre la mejora del rendimiento de los flujos del protocolo de datagramas de usuario (*User Datagram Protocol, UDP*) y la degradación del rendimiento de los flujos del protocolo de control de transmisión (*Transmission Control Protocol, TCP*) ajustando el parámetro de priorización de tráfico reconfigurable  $X$ . Cuando  $X$  se establece en cero, significaría que el segundo algoritmo y primer algoritmo son iguales.

```

 $N$  = Número de UEs;
 $CQI_i$  = Indicador de calidad del canal para UE  $i$ ;
 $T_i$  = Tipo de tráfico para UE  $i$ ;
 $RB$  = Bloque de recursos disponibles;
 $L$  = Lista de prioridades para la asignación de RB;
 $X$  = Porcentaje de usuarios en tiempo no real cuyas
prioridades se igualan a los usuarios en tiempo real;
inicializar  $L$  para vaciar
for  $i = 1$  a  $N$ 
if ( $T_i == UDP$ )
add UE  $i$  a la parte superior de  $L$ ,
el punto de inserción a  $L$  está determinado por  $CQI_i$ 
else if ( $T_i == TCP$ )
add UE  $i$  a la parte inferior de  $L$ ,
el punto de inserción a  $L$  está determinado por  $CQI_i$ 
move  $X\%$  de flujos TCP a la parte superior de  $L$ ,
allocate RBs a UEs según el orden en  $L$ 

```

Figura 3. 3: Pseudocódigo del segundo algoritmo.

Elaborado por: Autor

A partir del resultado de algoritmos de flujo en tiempo real y tiempo no real, se propone un tercer algoritmo que permite la creación de un escenario de tráfico múltiple, incluido el aspecto de control administrativo. Este algoritmo también puede manejar múltiples tráficos en tiempo real para voz sobre protocolo de internet (*Voice over Internet Protocol, VoIP*) y Video con el parámetro de rendimiento reconfigurable  $X$ . El código del tercer algoritmo propuesto se muestra en la figura 3.4. Esta propuesta tiene ventajas tanto para admitir la escala de tráfico múltiple como para tratar el tráfico en tiempo

real y tiempo no real de acuerdo con los parámetros de QoS especificados. Este código puede manejar tanto el tráfico en tiempo real como no real e incluso el tráfico múltiple.

```

N = Número de UEs;
CQIi = Indicador de calidad del canal para UE i;
Ti = Tipo de tráfico para UE i;
RB = Bloque de recursos disponibles;
L = Lista de prioridades para la asignación de RB;
X = Porcentaje de usuarios en tiempo no real cuyas
prioridades se igualan a los usuarios en tiempo real;
inicializar L para vaciar
for i = 1 a N
if (Ti == VoIP)
add UE i a la parte superior de L,
el punto de inserción a L está determinado por CQIi
if (Ti == Video)
add UE i a la parte inferior de L después de los usuarios de VoIP,
el punto de inserción a L está determinado por CQIi
else if (Ti == TCP)
add UE i a la parte inferior de L,
el punto de inserción a L está determinado por CQIi
move X% de flujos TCP a la parte superior de L,
el punto de inserción a L está determinado por los valores de CQI
allocate RBs a UEs de acuerdo con el orden en L

```

Figura 3. 4: Algoritmo-3 de asignación de radio base con prioridad de tráfico.  
Elaborado por: Autor

En este caso, el algoritmo propuesto desempeña un papel crucial para equilibrar el tráfico en tiempo real para obtener mejores resultados de rendimiento internamente al tiempo que controla el tiempo no real también. Para lograr QoS para el tráfico de VoIP, los usuarios de VoIP se evalúan en la parte superior de la lista de prioridades. La transmisión de video y los usuarios tienen tráfico en tiempo no real, y FTP, puede ser operado por el administrador de la red utilizando el tipo de tráfico y la información de calidad del canal. Esto, significa que el número de usuarios en tiempo no real con

valores CQI más altos puede moverse al área planificada para ser evaluado en el tráfico en tiempo real mediante el parámetro de priorización X.

La compensación entre la ventaja de rendimiento de los flujos UDP y la desventaja de los flujos TCP todavía existe, sin embargo, el parámetro X convierte las condiciones no deseadas en una forma positiva si se utiliza en el lugar correcto en el momento correcto. Denota que el parámetro X es un parámetro ajustable que puede cumplir con la expectativa de los requisitos de la red.

Mientras, que QoS se refiere a la capacidad de una red para garantizar un cierto nivel de rendimiento a un flujo de tráfico seleccionado utilizando diversas tecnologías. En las redes LTE, la calidad del servicio se mide cuantitativamente mediante medidas de rendimiento relacionadas de cada servicio de red, como el rendimiento, la pérdida de paquetes, el retardo, la fluctuación y la equidad.

La medición del rendimiento en el enlace descendente LTE depende de la cantidad de información transferida desde un servidor a un equipo de usuario dentro de un cierto tiempo. Por ejemplo, para la aplicación de transferencia de archivos, el rendimiento se calcula dividiendo el tamaño del archivo transferido (bits) a la duración de la descarga (segundos) para obtener el rendimiento en bits/s o bps. Cuando los usuarios comparten los mismos recursos de red; debido a los cambios dinámicos en las condiciones de la red, el rendimiento de los servicios en tiempo real puede no ser suficiente si todos los flujos de datos obtienen la misma prioridad de programación.

El retardo de extremo a extremo es otro criterio para cumplir con los requisitos de QoS de cada flujo de tráfico porque puede llevar mucho tiempo llegar a su destino. El retardo promedio de extremo a extremo en segundos se calcula dividiendo la suma del retardo de extremo a extremo de todos los paquetes recibidos por el número de paquetes recibidos. Los paquetes perdidos se excluyen en el cálculo del retardo promedio de extremo a extremo.

El rendimiento de la red de un usuario a menudo se mide no solo en términos de retardo, sino también en términos de la pérdida de paquetes, que se mide como el porcentaje del número de paquetes recibidos con respecto al número total de paquetes enviados. Un paquete perdido se retransmite para el tráfico TCP para garantizar que todos los datos TCP se transfieran de manera confiable desde el origen al destino.

Una distribución justa de los recursos del sistema entre los diferentes usuarios es otro parámetro importante de QoS. Hay varias definiciones matemáticas de equidad. Es decir, que la medida de equidad depende del índice de equidad de Jain donde el valor cambia entre 1 y 0. Cuando todos los usuarios tienen el mismo rendimiento, el índice de equidad se convierte en uno que indica el escenario ideal de equidad.

### **3.2. Entorno de simulación**

En esta sección, se explican los escenarios de simulación de los algoritmos propuestos y los resultados de la simulación se muestran a continuación. Una breve descripción de la herramienta de simulación OMNeT++ también se incluye en la parte del entorno de simulación

#### **3.2.1. Herramienta de simulación OMNeT++.**

OMNeT++ es un simulador de eventos discretos de código abierto que está especialmente diseñado para admitir la simulación de sistemas de red. Es sobre todo útil construir y representar estructuras jerárquicas que se utilizan con frecuencia en entornos de diseño. La plataforma de este simulador se implementa principalmente utilizando el lenguaje de programación C++. Además, dado que OMNeT++ utiliza la cadena de herramientas GCC o el compilador de Microsoft Visual C++, se puede ejecutar en las tres plataformas más comunes: Windows, OS X, Linux.

OMNeT++ se puede operar libremente para uso sin fines de lucro y proporciona una biblioteca de código abierto potente y consistente que puede ser utilizada fácilmente por instituciones orientadas a la investigación. Se utiliza principalmente en campos de investigación, especialmente en el área

de redes de comunicación. Otra ventaja de esta herramienta es que se pueden implementar diferentes estructuras de modelos en el entorno OMNeT++, aunque estos modelos se crean fuera de la plataforma OMNeT++. Además, los modelos y entramados específicos como VANET e INET pueden utilizarse para ampliar la funcionalidad proporcionada por la plataforma OMNeT++.

OMNeT++ está diseñado para simplificar la simulación de sistemas de red. Proporciona visualización y personalización con su entorno de desarrollo integrado (*Integrated Development Environment, IDE*). OMNeT++ IDE contiene múltiples editores de código fuente relacionados con diferentes actividades. También, IDE proporciona un entorno único para reunir múltiples estructuras en un solo compuesto y compilarlas en una sola unidad. Además, la modificación del componente de red se puede completar sin codificación mediante la herramienta OMNeT++ IDE. El entorno de simulación se muestra en la figura 3.5.

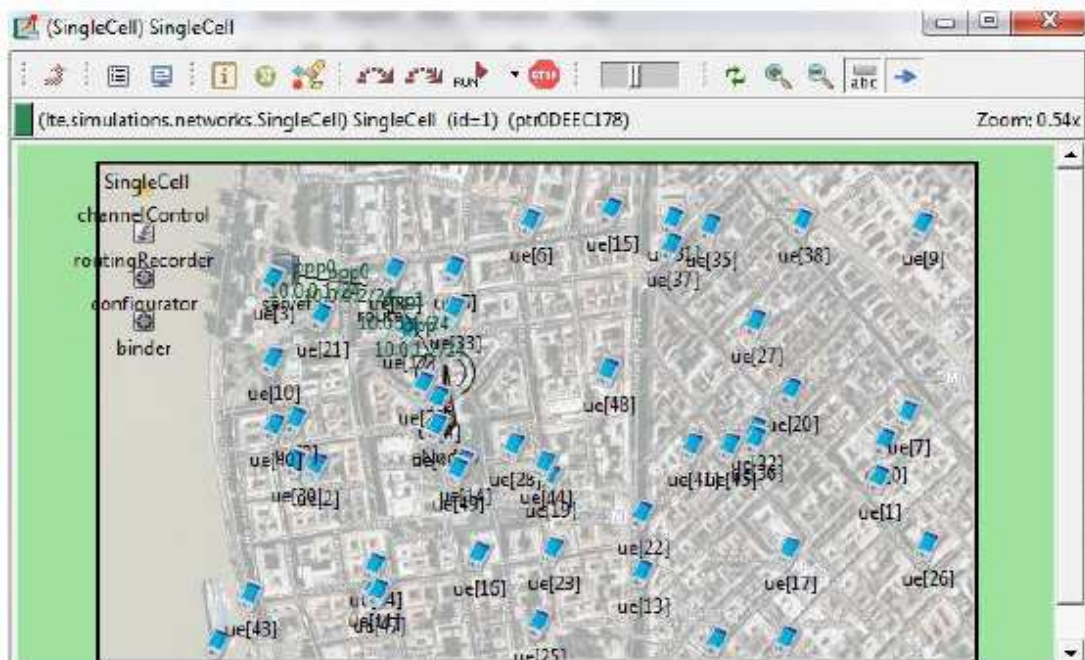


Figura 3. 5: Ejemplo de entorno de simulación OMNeT++.  
Elaborado por: Autor

La herramienta de simulación OMNeT++ tiene dos tipos de interfaces de usuario. Son interfaces TKENV y CMDENV. TKENV es la interfaz gráfica de usuario (GUI) de OMNeT++, tal como se muestra en la figura 3.6. Está construido para mostrar animación automática, ventanas de salida del módulo



e inspectores de objetos. La animación automática en OMNeT++ es capaz de animar al propietario de los mensajes en los gráficos de red. Las ventanas de salida del módulo permiten abrir ventanas separadas para la salida de módulos individuales o grupos de módulos. El inspector de objetos, que se puede utilizar para mostrar el estado o el contenido de un objeto de la manera más adecuada, es una ventana GUI asociada con un objeto de simulación.

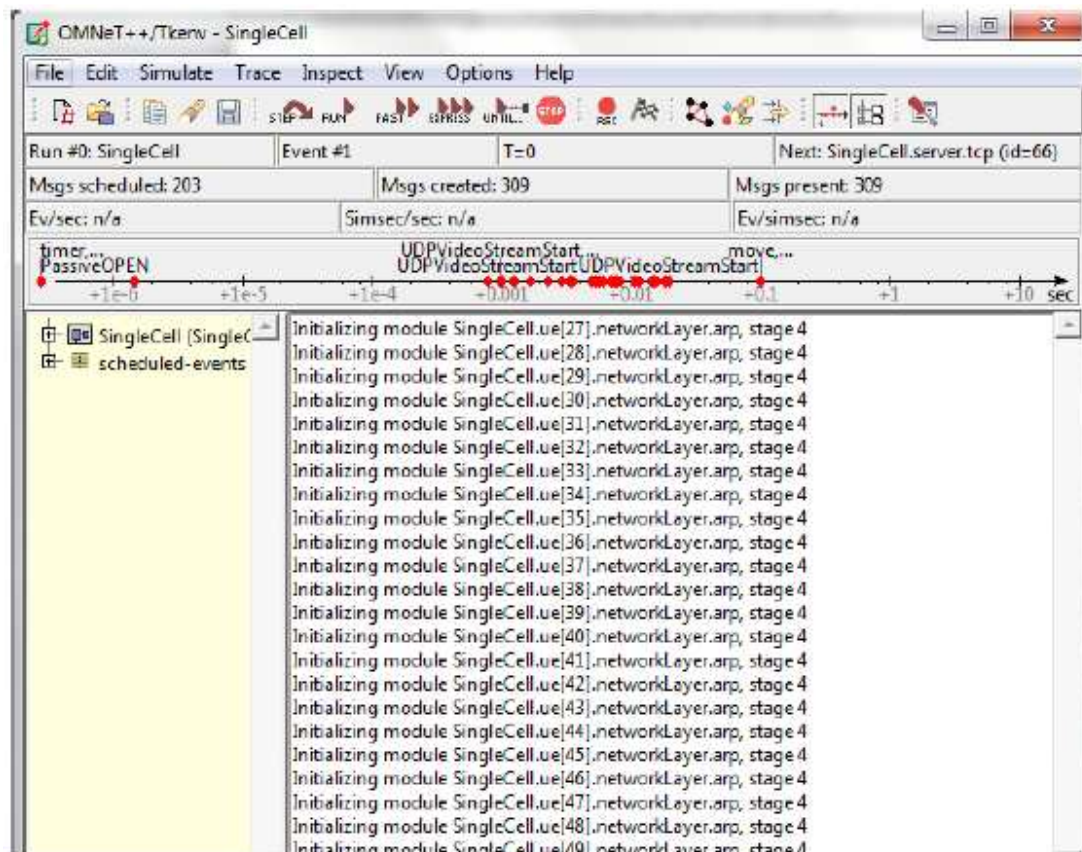


Figura 3. 6: Interface gráfica de usuario (GUI) de OMNeT++.  
Elaborado por: Autor

En el presente trabajo, el entorno de simulación OMNeT++ se utiliza con la ayuda del módulo "simulte-master", es un recurso abierto desarrollado para simular la red de acceso LTE, donde se pueden analizar y simular los tres algoritmos de programación propuestos en la sección anterior.

### 3.2.2. Simulación de escenarios y parámetros

La figura 3.7 muestra el escenario diseñado donde se tiene un servidor, un enrutador, un eNodeB y varios tipos diferentes de equipos de usuarios (UEs).

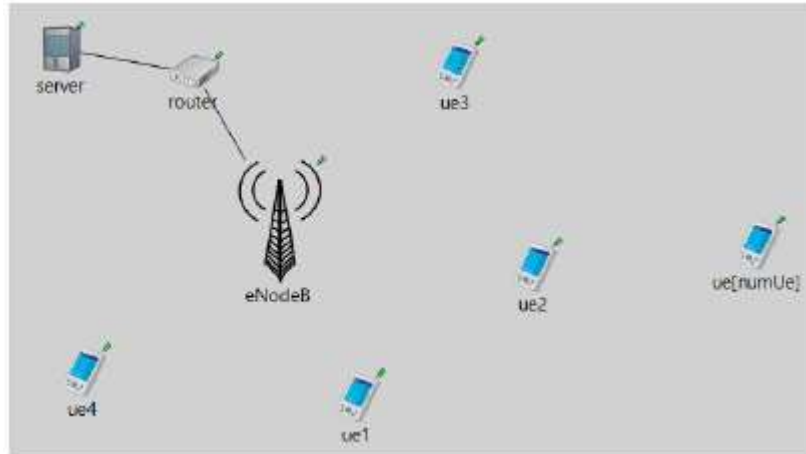


Figura 3. 7: Entorno de simulación.  
Elaborado por: Autor

Una breve ilustración del escenario de simulación se presenta en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1: Parámetros de simulación.

Parámetros	Valores
<b>eNodeB</b>	Estación base de celda única
<b>Equipo de usuario</b>	$N_{mínimo} = 50$ ; $N_{máximo} = 150$ ; Movilidad = estacionaria
<b>Configuración física</b>	Número de radio bases = 100 Número de subportadora = 12 Símbolo OFDM = 7 Ancho de banda = 20 MHz
<b>Modelo de pérdida de ruta</b>	Macrocela URBANA
<b>Modelo de tráfico</b>	Tipo de tráfico = UDP video, VoIP y TCP (FTP) Tamaño del paquete = 1000 bytes Intervalo enviado = 10 ms

Elaborado por: Autor

Como se puede ver en la Tabla 3.1, se demuestran los parámetros de simulación. El sistema SISO con configuración de celda única se utiliza durante las simulaciones. Mientras que el tráfico UDP se representa descargando video del servidor y la comunicación VoIP, el tráfico TCP está diseñado para usuarios FTP. La movilidad de los usuarios se elige movilidad estacionaria en un ancho de banda de 20 MHz que proporciona 100 bloques de recursos disponibles para asignación entre usuarios móviles.

Para cada algoritmo propuesto, el entorno de simulación utiliza los mismos parámetros de simulación. La condición de prueba se realiza cambiando el número de usuarios de tiempo real (TR) y tiempo no real (TNR).

### 3.3. Resultados de la simulación de algoritmos propuestos.

#### 3.3.1. Análisis de resultados obtenidos para el primer y segundo algoritmo.

En el primer conjunto de experimentos, los rendimientos del primer algoritmo y MaxC/I se comparan variando el número de UEs de 60 a 150 (véase la figura 3.8). Para todos los experimentos, el 80% del total de usuarios solo tiene tráfico en tiempo real para UDP, mientras que el 20% del total de usuarios solo tiene tráfico en tiempo no real para TCP. Esto indica, por ejemplo, que 120 equipos de usuarios con tráfico en tiempo real, 30 equipos de usuarios con tráfico en tiempo no real para un total de 150 equipos de usuarios.

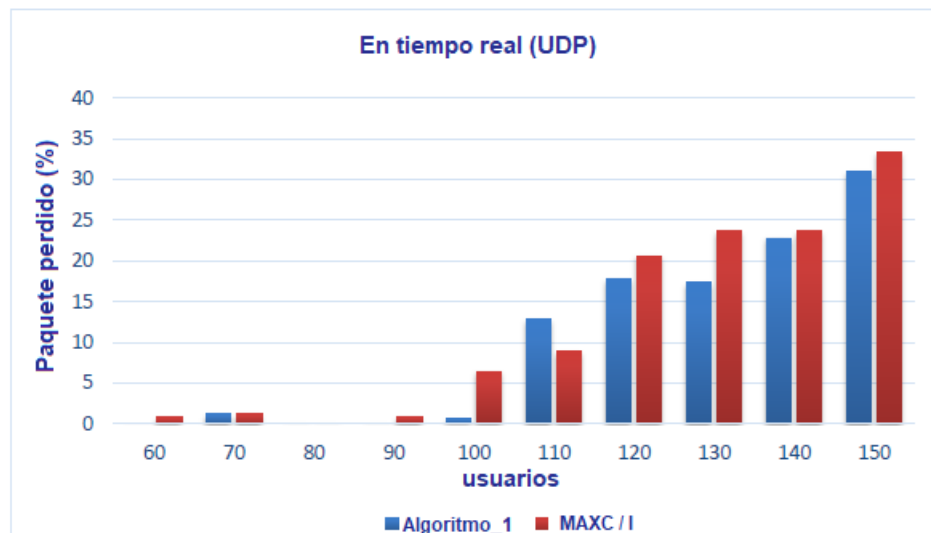


Figura 3. 8: Pérdida de paquetes de tráfico en tiempo real para UDP.  
Elaborado por: Autor

En el segundo conjunto de experimentos, el número de equipos de usuarios se establece en 150 y los efectos del parámetro de priorización del tráfico en el rendimiento de los usuarios en tiempo real y no en tiempo real se analizan variando X entre 10% y 40%. En otras palabras, las simulaciones del segundo algoritmo se realizan solo con 150 usuarios cambiando el porcentaje de tráfico TCP al que se le da mayor prioridad. Este escenario se selecciona

particularmente para demostrar los efectos del mecanismo de priorización de tráfico reconfigurable. Como solo hay 100 bloques de recursos (RB) los recursos de radio no son suficientes para soportar 150 equipos de usuarios.

La figura 3.8 también muestra los porcentajes de pérdida de paquetes del tráfico en tiempo real para UDP ya que el número de equipos de usuarios varía de 60 a 150. Cada flujo UDP tiene tráfico de velocidad de bits constante (tamaño de paquete de 1000 bytes e intervalo de envío de 10 ms). La cantidad de tráfico inyectado a la red aumenta cuando aumenta el número de equipos de usuarios. Dado que el número de bloques de recursos está limitado a 100, las tasas de pérdida de paquetes son muy bajas cuando el número de equipos de usuarios es inferior a 100 para ambos algoritmos.

El primer algoritmo proporciona mayor prioridad a los flujos en tiempo real cuando los bloques de recursos se asignan a los equipos de usuarios y, por lo tanto, las tasas de pérdida de paquetes promedio son más bajas en comparación con MaxC/I cuando el número de equipos de usuarios es mayor o igual a 100. A continuación, la figura 3.9 presenta los resultados de rendimiento del tráfico en tiempo no real para TCP.

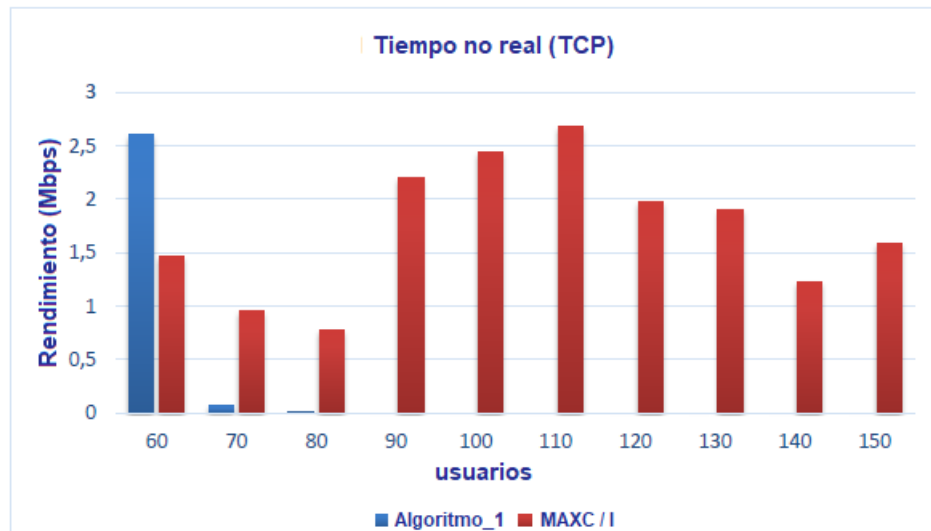


Figura 3. 9: Pérdida de paquetes de tráfico en tiempo no real para TCP.  
Elaborado por: Autor

Dado que el primer algoritmo proporciona prioridad estricta a los flujos en tiempo real, los valores de rendimiento para el tráfico en tiempo no real se

vuelven insignificantes cuando el número de equipos de usuarios supera los 80. Sin embargo, MaxC/I siempre proporciona ciertos valores de rendimiento independientemente de cuántos equipos de usuarios existan en el sistema.

La figura 3.10 y figura 3.11 muestran los valores de rendimiento para el tráfico en tiempo real y las tasas de pérdida de paquetes promedio para el tráfico en tiempo real, respectivamente, cuando se utiliza el segundo algoritmo. El eje x representa el porcentaje de usuarios de tráfico en tiempo no real cuyas prioridades se hacen iguales a los usuarios de tráfico en tiempo real (el parámetro X en segundo algoritmo, donde X% de los flujos en tiempo no real se mueven hacia la parte superior de la lista de programación).

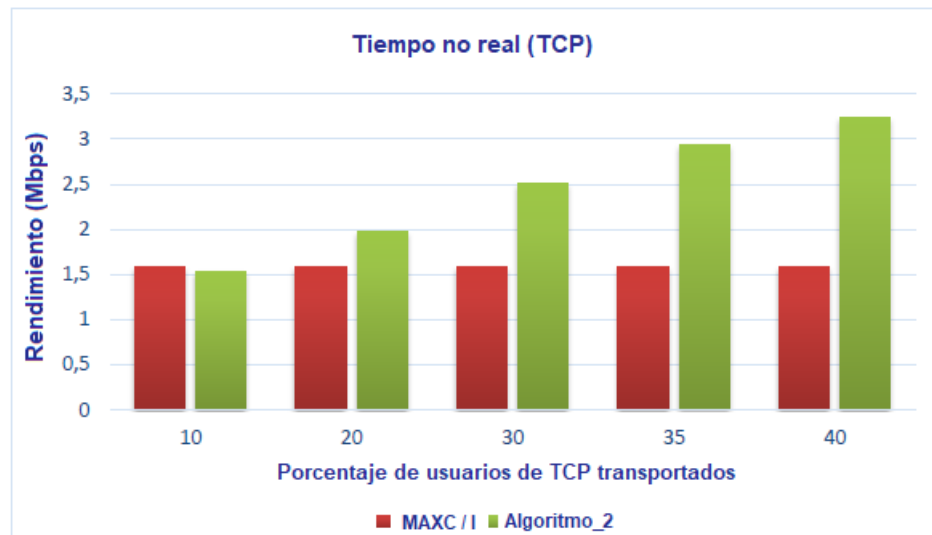


Figura 3. 10: Rendimiento del tráfico en tiempo no real para TCP.  
Elaborado por: Autor

Para estos experimentos, el número de equipos de usuarios se establece en 150. Los valores numéricos de la figura 3.10 y figura 3.11 se utilizan para MaxC/I y primer algoritmo como referencia (los resultados no dependen de X). Como se muestra en la figura 3.10, cuando el valor de X aumenta, los valores de rendimiento del tráfico en tiempo no real aumentan. Sin embargo, estas mejoras reflejan degradaciones del rendimiento en las tasas promedio de pérdida de paquetes para los usuarios en tiempo real, tal como se muestra en la figura 3.11. Estos resultados demuestran que la compensación entre la mejora del rendimiento de los flujos UDP y la degradación del rendimiento de

los flujos TCP se pueden controlar ajustando el parámetro X de priorización de tráfico reconfigurable del algoritmo de programación propuesto.

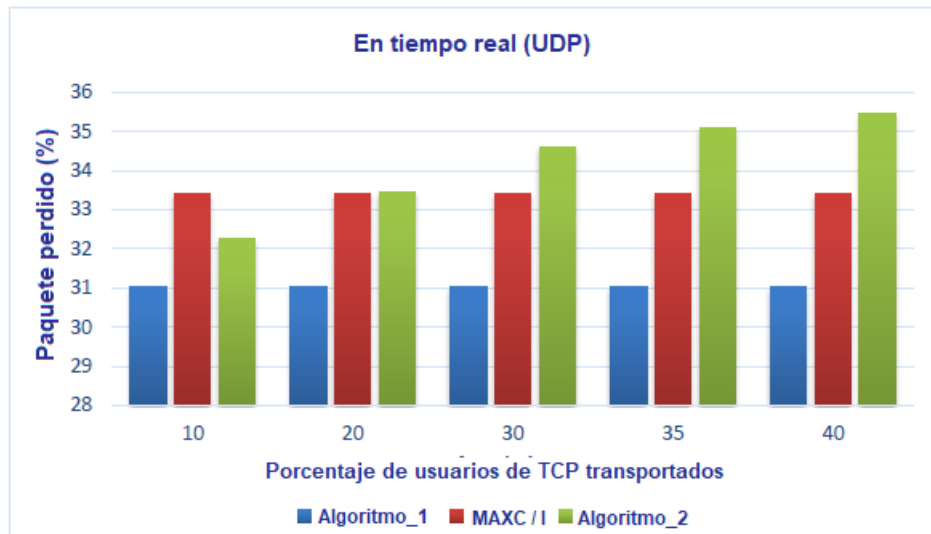


Figura 3. 11: Pérdida de paquetes de tráfico en tiempo real para UDP.  
Elaborado por: Autor

En consecuencia, la figura 3.12 muestra resultados de equidad para el tráfico en tiempo no real, y la figura 3.13 muestra la equidad del tráfico en tiempo real. Los resultados de la simulación confirmaron que cuando aumenta el parámetro X, el segundo algoritmo produce resultados más justos para el tráfico en tiempo no real. Por el contrario, la equidad de tráfico en tiempo real se ve afectada por esta compensación que después del 20% cae eventualmente.

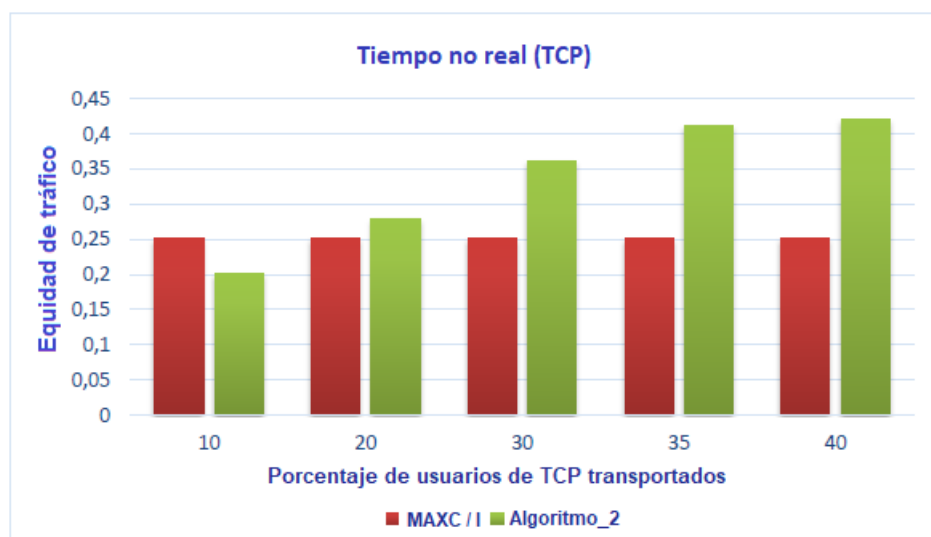


Figura 3. 12: Equidad del tráfico en tiempo no real para UDP.  
Elaborado por: Autor

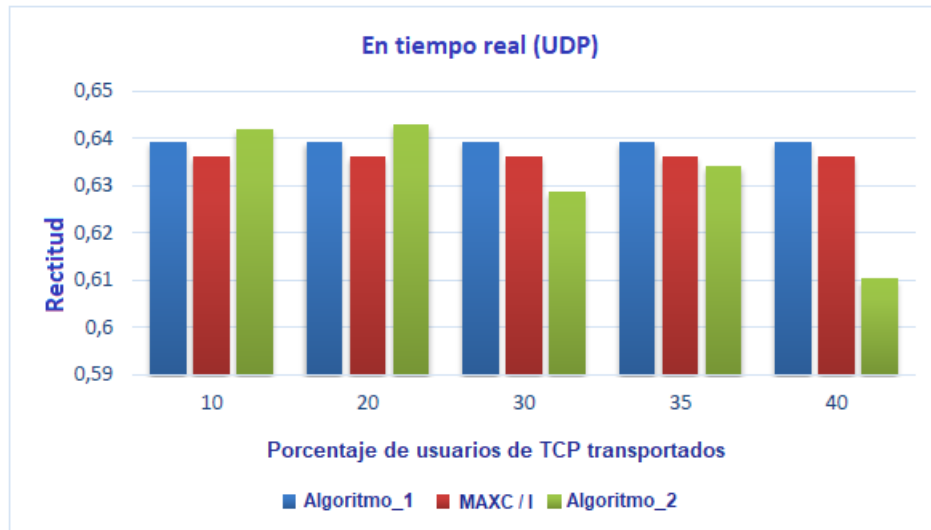


Figura 3. 13: Equidad del tráfico RT (UDP).  
Elaborado por: Autor

### 3.3.2. Análisis de resultados obtenidos para el tercer algoritmo.

En este conjunto de experimentos, el rendimiento del tercer algoritmo se compara con MaxC/I y PF variando el número de equipos de usuarios de 60 a 150. Para todos los experimentos, el 80% del total de usuarios solo tiene tráfico en tiempo real para UDP que es 40% de tráfico de VoIP y 40% de transmisión de video, mientras que el 20% del total de usuarios solo tiene tráfico en tiempo no real para TCP. Esto indica, por ejemplo, que 40 equipos de usuarios con tráfico de VoIP en tiempo real, 40 equipos de usuarios con tráfico de transmisión de video en tiempo real, 20 equipos de usuarios con tráfico FTP en tiempo no real para un total de 100 equipos de usuarios.

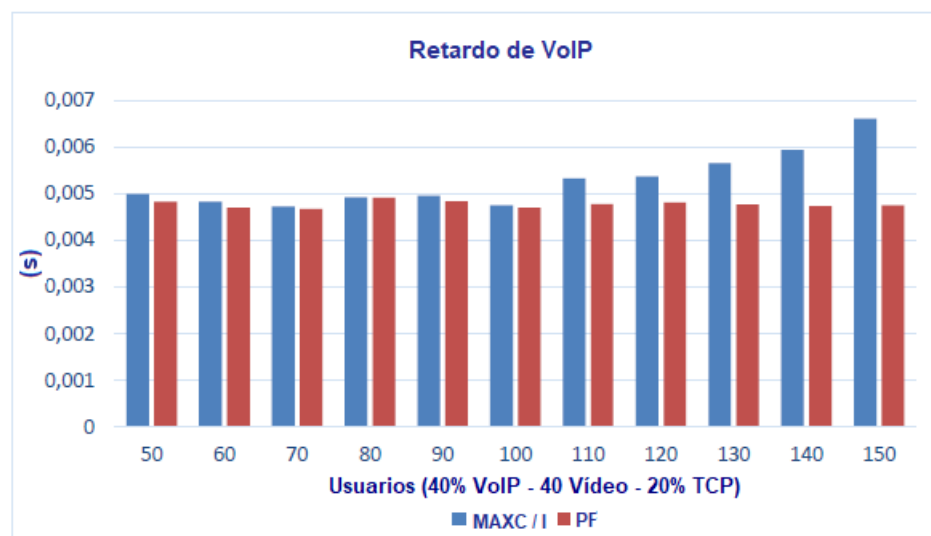


Figura 3. 14: Retardo de VoIP para MaxC / I y PF.  
Elaborado por: Autor

El rendimiento de retardo de los algoritmos MaxC/I y PF se ilustra en las figuras 3.14 y 3.15 en términos de usuarios de VoIP y tráfico de video entre un número creciente de usuarios de 50 a 150. Además, la figura 3.16 representa los resultados de pérdida de paquetes de VoIP.

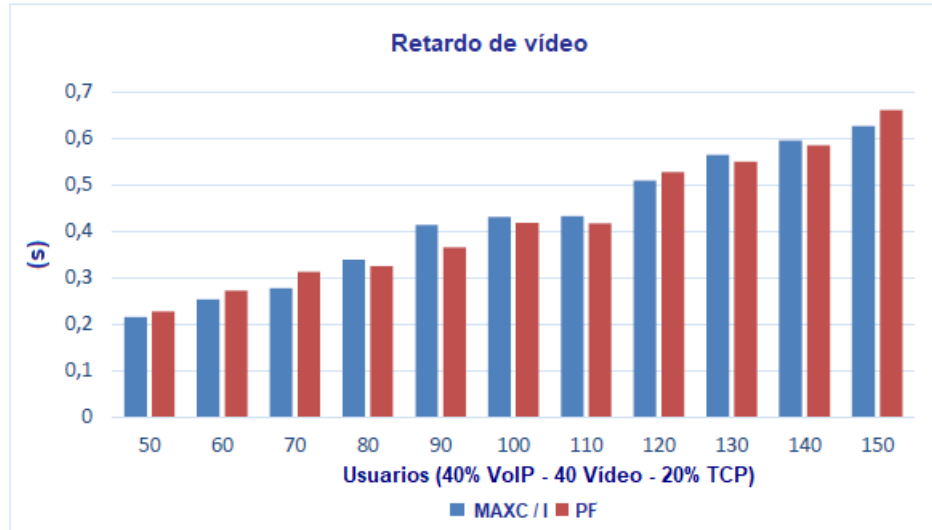


Figura 3. 15: Retardo de video para MaxC/I y PF.  
Elaborado por: Autor

La distribución diferida de VoIP se logra hasta que la red se carga con 110 equipos de usuarios. Sin embargo, la tasa de retardo aumenta drásticamente a medida que llega a los 150 equipos de usuarios. Además, el retardo de video de los algoritmos existentes aumenta notablemente, especialmente si la red es utilizada por 150 equipos de usuarios.

La figura 3.28 muestra el porcentaje de pérdida de paquetes de VoIP con respecto a los algoritmos MaxC / I y PF al cambiar el número de usuarios en orden ascendente entre 50 y 150. La diversidad de usuarios tiene sentido cuando el número de usuarios supera los 90. Ese punto establece el umbral donde la saturación del número de bloques de recursos disponibles comienza. Se puede ver en el gráfico que menos de 90 equipos de usuarios, MaxC / I funcionan mejor, mientras que el algoritmo PF funciona con una menor pérdida de paquetes por encima de 90 equipos de usuarios. Además, después del usuario 130, la brecha de pérdida de paquetes entre los algoritmos se incrementa.



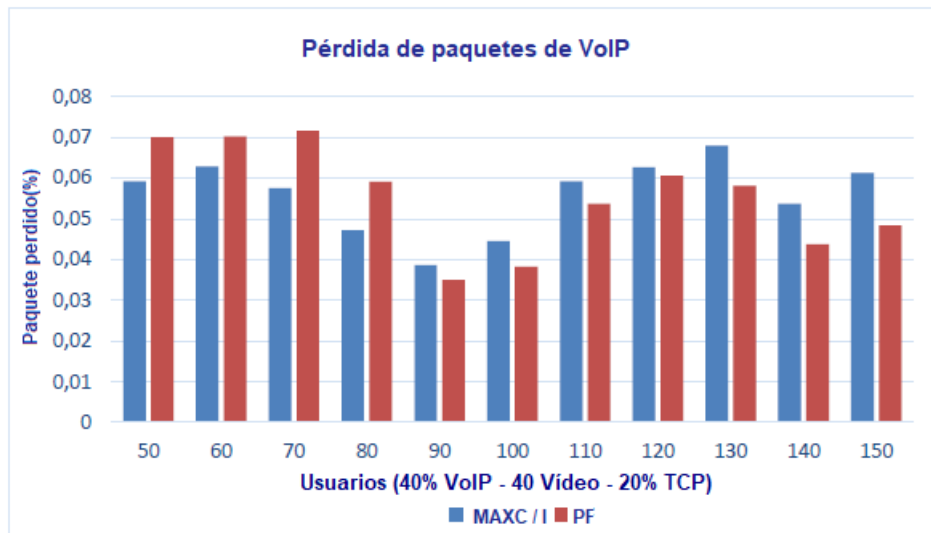


Figura 3. 16: Pérdida de paquetes de VoIP para MaxC / I y PF.  
Elaborado por: Autor

En la figura 3.17, es evidente que la pérdida de paquetes TCP entre los usuarios se distribuyen a favor del algoritmo PF con porcentajes más bajos de pérdida de paquetes. Por el contrario, la pérdida de paquetes en MaxC / I es mayor que PF para cada condición de carga de la red.

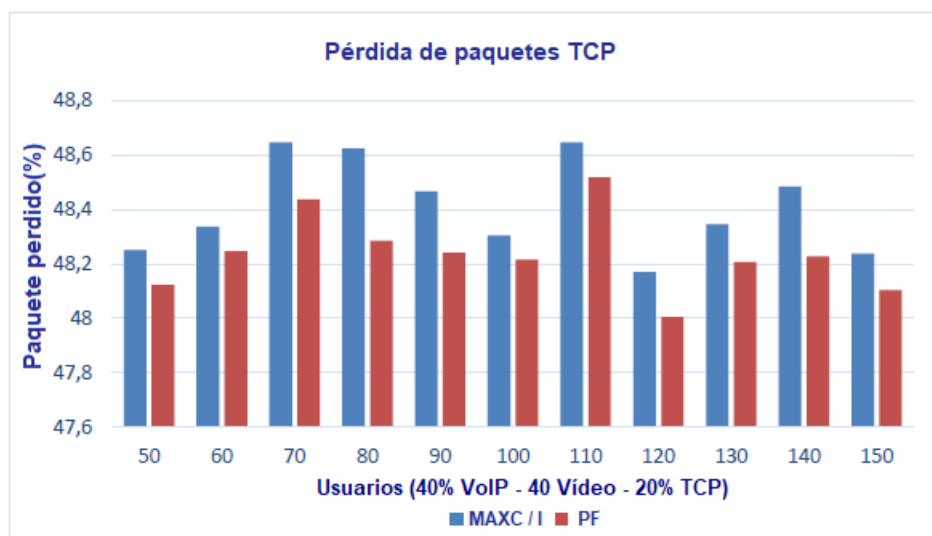


Figura 3. 17: Pérdida de paquetes TCP (FTP) para MaxC/I y PF.  
Elaborado por: Autor

La figura 3.18 indica el rendimiento del tráfico en tiempo real con respecto a los algoritmos MaxC / I y PF entre 50 y 150 equipos de usuarios. Es inevitable a partir de la figura que el rendimiento en tiempo real aumenta con el creciente número de equipos de usuarios.

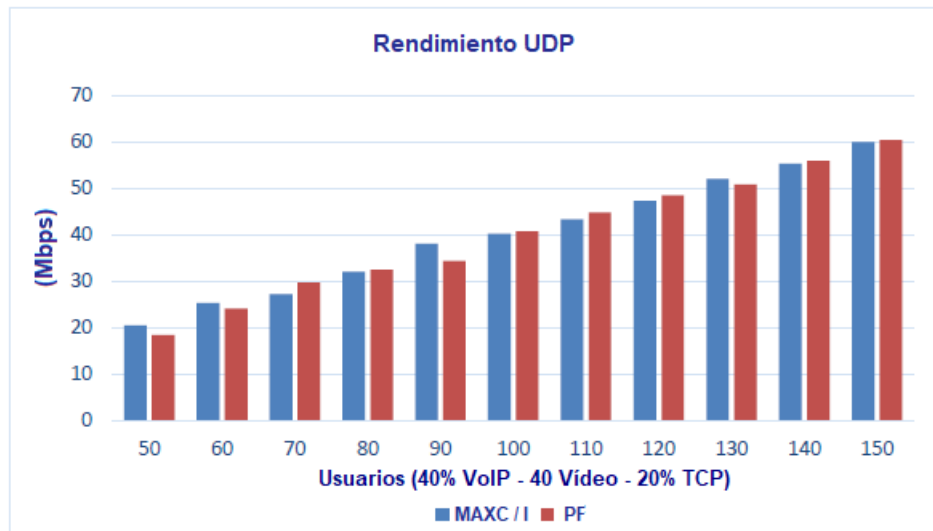


Figura 3. 18: Rendimiento UDP (VoIP, Video) para MaxC / I y PF.  
Elaborado por: Autor

La figura 3.19 muestra el rendimiento del tráfico en tiempo real y no real según los algoritmos MaxC / I y PF. Como se espera, las tasas de rendimiento aumentan como resultado de la cantidad creciente de equipos de usuarios.

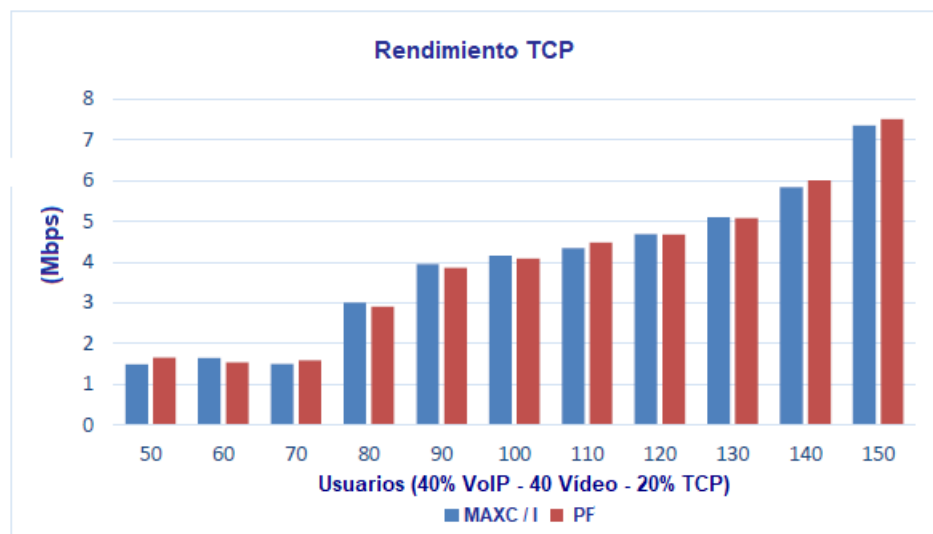


Figura 3. 19: Rendimiento TCP (FTP) para MaxC / I y PF.  
Elaborado por: Autor

Las figuras 3.20 y 3.21 demuestran el rendimiento de retardo del tercer algoritmo propuesto, de acuerdo con los algoritmos MaxC / I y PF. Los valores verticales muestran cuántos usuarios en tiempo no real se mueven a la parte en tiempo real de la lista. Este método de percentil se utiliza para definir algunos umbrales para cumplir con los requisitos de calidad y servicio (QoS) entre los tráficos en tiempo real y no real. De los gráficos se puede concluir

que el algoritmo propuesto puede lograr un retardo promedio para VoIP incluso mucho mejor que el algoritmo MaxC/ I. Sin embargo, el retardo del video aumenta drásticamente después del 20% de manera desfavorable cuando se compara con MaxC / I. Por otro lado, este retardo no excede los valores del algoritmo PF incluso para el 40%.

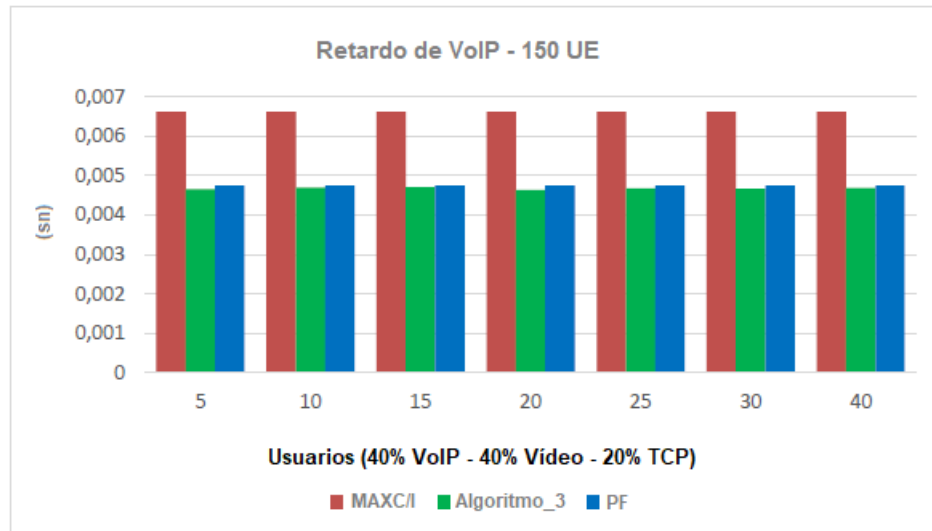


Figura 3. 20: Retardo de VoIP para MaxC/I, PF y 3er algoritmo.  
Elaborado por: Autor

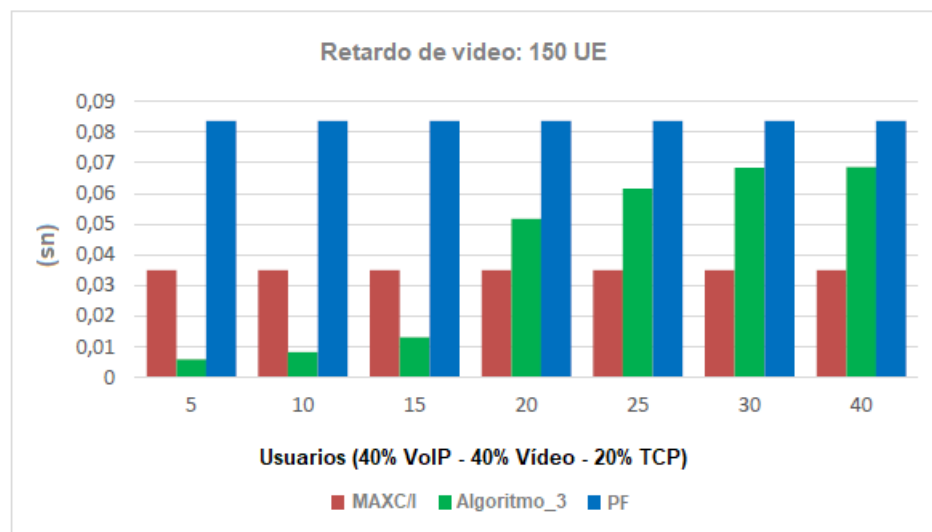


Figura 3. 21: Retardo de Video para MaxC/I, PF y 3er algoritmo.  
Elaborado por: Autor

Además, se puede ver en los gráficos que el algoritmo PF logra minimizar el retardo de VoIP donde MAXC / I funciona bien para el retardo de video. Se requiere un parámetro reconfigurable para lograr el servicio de calidad mediante el tercer algoritmo. En consecuencia, las figuras 3.22, 3.23,

y 3.24 indican los resultados de rendimiento de TCP, Video y VoIP respectivamente.

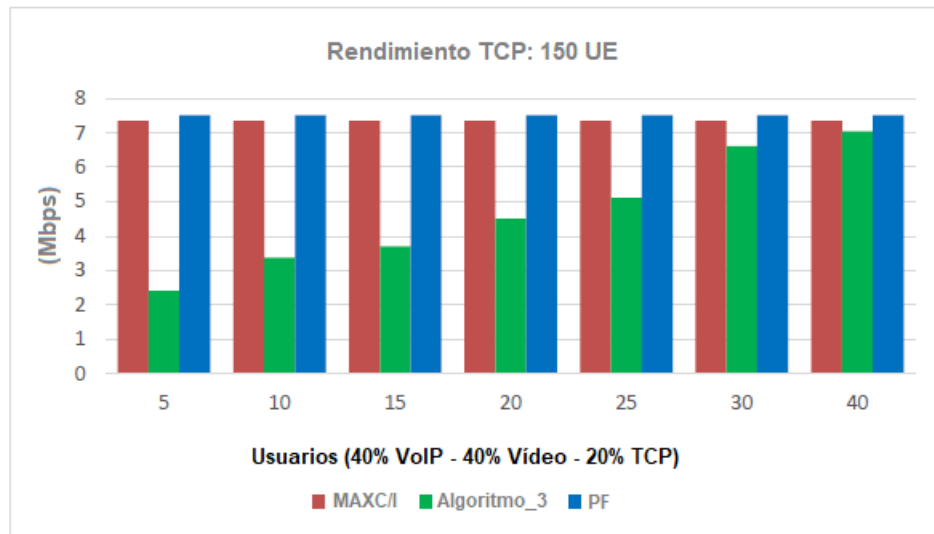


Figura 3. 22: Rendimiento TCP para MaxC/I, PF y 3er algoritmo.  
Elaborado por: Autor

De los resultados se puede obtener que el valor de rendimiento de TCP está creciendo porque el porcentaje del usuario en tiempo no real aumenta relativamente en la lista de candidatos. El tercer algoritmo admite la estabilidad entre los algoritmos MAXC / I y PF hasta que alcanza el 40%.

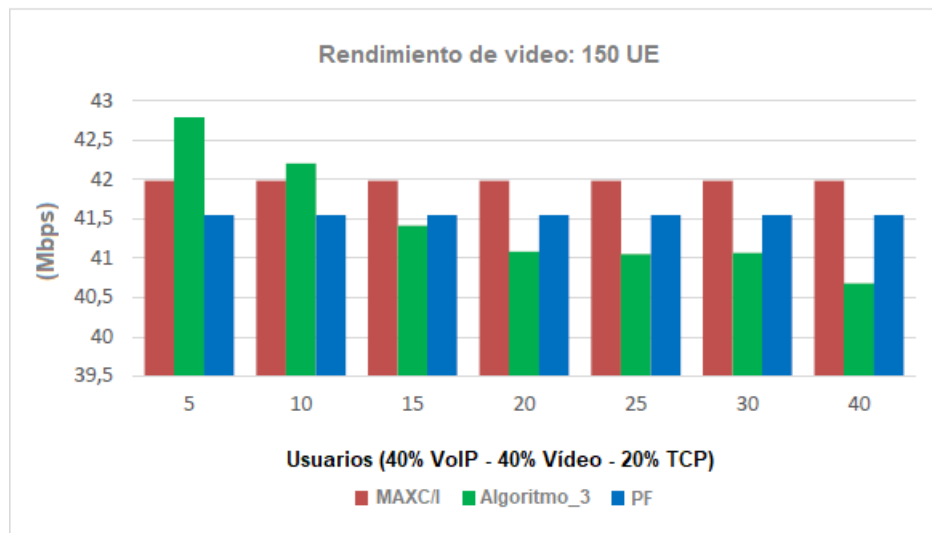


Figura 3. 23: Rendimiento de video para MaxC/I, PF y 3er algoritmo.  
Elaborado por: Autor

El rendimiento de video y los gráficos de retardo de las figuras 3.23 y 3.21 establecen la compensación de la priorización de usuarios en tiempo no real. Dado que los algoritmos MAXC / I y PF consideran en primer lugar a los

usuarios de tráfico de VoIP, el tercer algoritmo mueve a los usuarios de VoIP a la parte superior de la lista, lo que ofrece una ventaja para mantener las expectativas de rendimiento entre PF y MAXC / I, tal como se muestra en la figura 3.24.

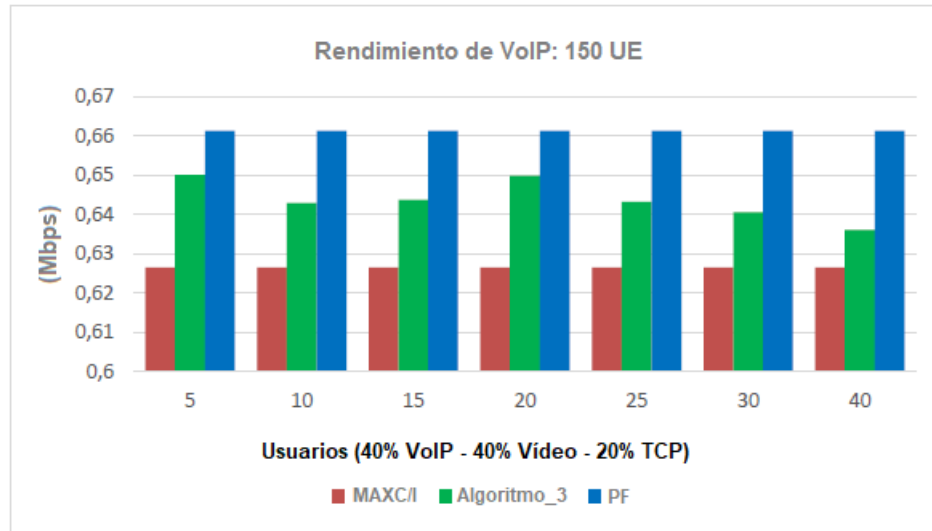


Figura 3. 24: Rendimiento de VoIP para MaxC/I, PF y 3er algoritmo.  
Elaborado por: Autor

Por otro lado, la compensación entre el retardo y el rendimiento se puede observar especialmente después del 20%. Cuando se incrementa el porcentaje de usuarios móviles en tiempo no real, los valores de rendimiento de TCP de ellos también aumentan. Especialmente después del 20% de rendimiento está aumentando significativamente.

Sin embargo, estas mejoras reflejan la tasa promedio de pérdida de paquetes en usuarios en tiempo real. La tasa promedio de pérdida de paquetes en el tráfico en tiempo real aumenta drásticamente después del 20% de manera desfavorable cuando se compara con MAXC / I, tal como se muestra en la figura 3.25. Además, los resultados de retardo y rendimiento del tráfico de video se ven afectados en ese sentido, tal como se mostró en las figuras 3.21 y 3.23.

El gráfico de las figuras 3.26 y 3.27 señalan la ventaja de equidad del algoritmo propuesto.

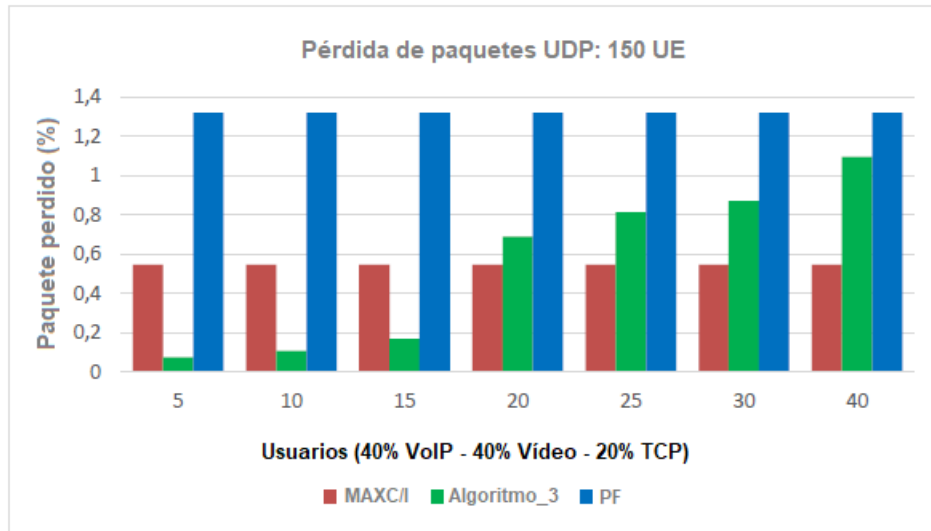


Figura 3. 25: Pérdida de paquetes UDP para MaxC/I, PF y 3er algoritmo.  
Elaborado por: Autor

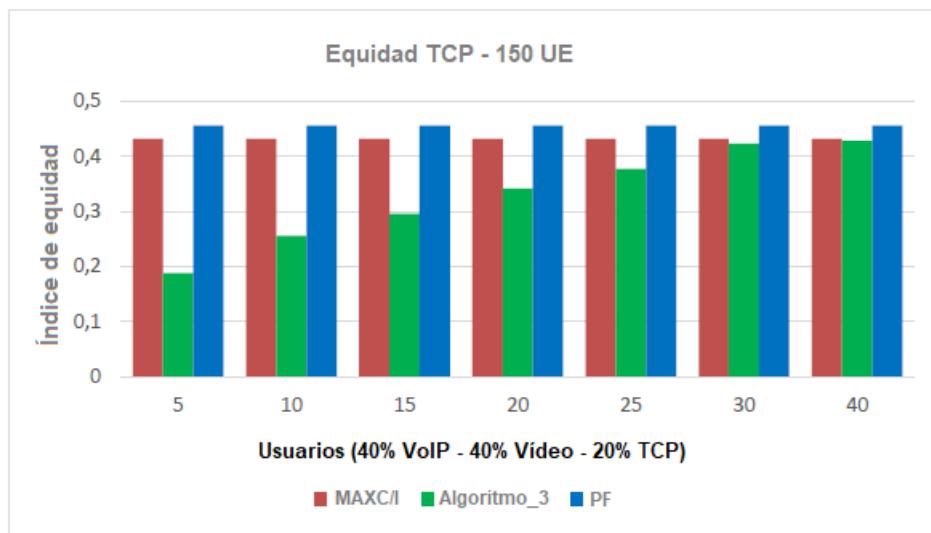


Figura 3. 26: Equidad TCP para MaxC / I, PF y 3er algoritmo.  
Elaborado por: Autor

Aunque la equidad de TCP aumenta con respecto al número creciente de usuarios de TCP, la equidad de tráfico de UDP puede mantenerse dentro de un intervalo razonable entre los algoritmos MAXC / I y PF.

El parámetro del índice de equidad representado en 3.22 y la Figura 3.23 se ilustran para mostrar los flujos TCP y UDP, respectivamente. Este parámetro muestra cómo el sistema está sirviendo a los usuarios de manera justa mediante la asignación de una parte justa de los recursos del sistema.

Por lo tanto, las cifras muestran que el planificador propuesto logra una mayor imparcialidad para los diferentes tipos de servicios.

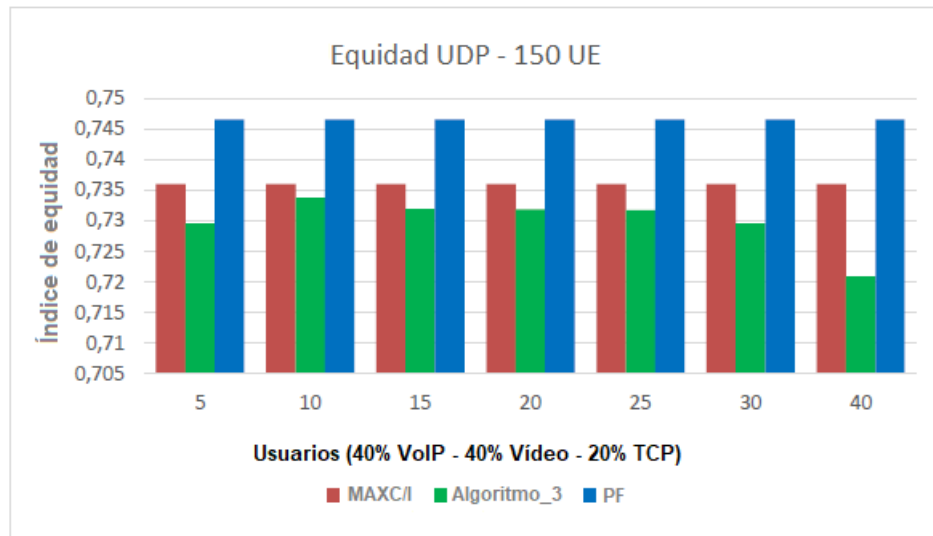


Figura 3. 27: Equidad UDP para MaxC/I, PF y 3er algoritmo.  
Elaborado por: Autor

## Conclusiones

1. En la descripción teórica, se puede definir que LTE presenta como una interfaz de radio flexible para proporcionar interoperabilidad de redes heterogéneas, el uso de ancho de banda flexible y soporte de servicios basados en IP de extremo a extremo. Para objetivar estas especificaciones, el planificador de redes LTE es el habilitador clave para garantizar los requisitos de calidad de servicio (QoS) maximizando el uso de recursos limitados.
2. Los algoritmos de programación propuestos son reconfigurables con reconocimiento de calidad de servicio (QoS) que brindan mayor prioridad a los usuarios en tiempo real mediante la programación dependiente del canal. Ninguno de los algoritmos de programación existentes como Round Robin, MaxC / I y PF no tienen en cuenta tanto los tipos de tráfico como las cualidades del canal y no hay garantía de servicio para el tráfico en tiempo real.
3. Los resultados de la simulación basados en OMNeT ++ demuestran que la compensación entre la mejora del rendimiento de los flujos en tiempo real y la degradación del rendimiento de los flujos en tiempo no real puede controlarse ajustando el parámetro de priorización de tráfico reconfigurable del algoritmo de programación propuesto con múltiples escenarios de tráfico.



## **Recomendaciones**

1. Realizar propuestas de implementación de escenarios de simulación estaciones base múltiple, o escenarios de tráfico realistas que incluyen más clases de tráfico en redes LTE.
2. Añadir al algoritmo propuesto la medición de otros datos de rendimiento como, retardo, pérdida de paquetes, etc.

## Bibliografía

- Andreozzi, M. M. (2011). LTE and LTE-Advanced evaluation through innovative simulation tool. *2011 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/WoWMoM.2011.5986199>
- Bernhardt, M. (2019). *Alineamiento de interferencia y autointerferencia en sistemas de comunicaciones inalámbricas de última generación* [Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur]. <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/4592>
- Cepeda Cabeza, F. J. (2018). *Técnicas avanzadas de comunicaciones radio para 5G con MIMO masivo* [Trabajo Finde Grado, Universidad Carlos III de Madrid]. <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/29572>
- Cox, C. (2014). *Performance of LTE and LTE-Advanced*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118818046.ch23>
- Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2011). *4G LTE/LTE-advanced for mobile broadband*. Elsevier, Acad. Press.
- Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2016). Scheduling and Rate Adaptation. En *4g, LTE Evolution and the Road to 5G* (pp. 249–267). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804575-6.00009-1>
- de Andrade, T. P. C., Astudillo, C. A., & da Fonseca, N. L. S. (2016). Allocation of Control Resources for Machine-to-Machine and Human-to-Human Communications Over LTE/LTE-A Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(3), 366–377. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2557240>
- Kanchi, S., Sandilya, S., Bhosale, D., Pitkar, A., & Gondhalekar, M. (2013). Overview of LTE-A technology. *2013 IEEE Global HighTech Congress*

on *Electronics*, 195–200.  
<https://doi.org/10.1109/GHTCE.2013.6767272>

Labib, M., Marojevic, V., & Reed, J. H. (2015). Analyzing and enhancing the resilience of LTE/LTE-A systems to RF spoofing. *2015 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, 315–320. <https://doi.org/10.1109/CSCN.2015.7390464>

Monem, M. A. (2017). *LTE Radio Channels*. Network Manias. <https://netmanias.com/en/?m=view&id=blog&no=12895>

Olivera Alonso, Y. (2016). *Estudio del uso de redes heterogéneas para expandir la cobertura y capacidad de las redes móviles* [Thesis, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas . Facultad de Ingeniería Eléctrica. Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones].  
<http://dspace.uclv.edu.cu:8089/xmlui/handle/123456789/6839>

Revolution Wi-Fi. (2015). *PHY Basics: How OFDM Subcarriers Work*. Revolution Wi-Fi.  
<http://www.revolutionwifi.net/revolutionwifi/2015/3/how-ofdm-subcarriers-work>

Telecom Engineer. (2018). Engineering academy: Introduction for LTE RADIO INTERFACE and UE states and area concepts. *Engineering academy*.  
<http://engineering-academy.blogspot.com/2018/06/introduction-for-lte-radio-interface.html>.

3GPP. (2019). *The Mobile Broadband Standard—LTE*.  
<https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>

Villarreal Tercero, L. N., & Pérez Aguarca, L. J. (2015). *Procedimientos de optimización en redes de acceso 3G WCDM/HSPA y su efectividad en*

*casos de estudio en Nicaragua* [Other, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://ribuni.uni.edu.ni/1316/>

Yonis, A. Z., Abdullah, M. F. L., & Ghanim, M. F. (2012). *LTE-FDD and LTE-TDD for Cellular Communications*. Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceeding.

Zaidi, Z., Friderikos, V., Yousaf, Z., Fletcher, S., Dohler, M., & Aghvami, H. (2018). Will SDN Be Part of 5G? *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(4), 3220–3258. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2836315>

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Toro Zambrano, Anthony Gabriel** con C.C: # 070504239-8 autor del trabajo de titulación: Implementación de algoritmos de medición de QoS para redes LTE utilizando el simulador OMNeT++, previo a la obtención del título de **Ingeniero en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 3 de marzo del 2020

f. \_\_\_\_\_

Nombre: **Toro Zambrano, Anthony Gabriel**

C.C: 070504239-8

<b>REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA</b>			
<b>FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN</b>			
<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Implementación de algoritmos de medición de QoS para redes LTE utilizando el simulador OMNeT++.		
<b>AUTOR(ES)</b>	Toro Zambrano, Anthony Gabriel		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	M. Sc. Pacheco Bohórquez, Héctor Ignacio; M. Sc. Edwin Fernando Palacios Meléndez		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>PROGRAMA:</b>	Ingeniería en Telecomunicaciones		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero en Telecomunicaciones		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	3 de marzo del 2020	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	55
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Comunicaciones Inalámbricas, Fundamentos de Comunicación		
<b>PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:</b>	COMUNICACIONES, ARQUITECTURAS, PROTOCOLOS, SIMULADOR, QOS, MÓVIL		
<b>RESUMEN/ABSTRACT:</b>	<p>La presente documentación refiere al trabajo de titulación denominado “Implementación de algoritmos de medición de QoS para redes LTE utilizando el simulador OMNeT++”. En este trabajo se realiza una breve descripción de las generalidades de la problemática a resolver, como la introducción, los antecedentes, definición y justificación del problema de investigación. Todo esto se define de manera clara para posteriormente plantear el objetivo general y los específicos del trabajo de titulación. Posteriormente, se realiza la caracterización de los fundamentos de redes inalámbricas móviles como en este caso, lo es LTE. Después se escoge la herramienta de simulación más apropiada y se elige a la plataforma de simulación OMNeT++ por ser un simulador en tiempo discreto, y que dispone de librerías de todas las tecnologías inalámbricas. Finalmente, se presentaron los tres algoritmos, para después diseñar la red móvil LTE en OMNeT++, se ejecutan las simulaciones y se obtienen los resultados de los escenarios propuestos.</p>		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> 0990781304	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:anthonytorozambrano@gmail.com">anthonytorozambrano@gmail.com</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):</b>	<b>Nombre:</b> Palacios Meléndez Edwin Fernando		
	<b>Teléfono:</b> +593-9-68366762		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec">edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			