

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



## FACULTAD DE INGENIERÍA

### CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

**“Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:**

**Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones”**

#### **TRABAJO DE TITULACIÓN**

**“MODELADO Y EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO DE TRES TÉCNICAS DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS EN UNA RED CELULAR 5G CON NETWORK SLICING”**

**Autor:**

Edinson Dario Sozoranga Valarezo

**Tutor:**

Ing. Luis Tello Oquendo, PhD.

Riobamba – Ecuador

Año 2022

Los miembros del tribunal de graduación del proyecto de investigación de título: **“MODELADO Y EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO DE TRES TÉCNICAS DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS EN UNA RED CELULAR 5G CON NETWORK SLICING”**, presentado por Edinson Darío Sozoranga Valarezo, dirigido por Ing. Luis Patricio Tello Oquendo, PhD.

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la UNACH.

Para constancia de lo expuesto firman.

Mgs. Giovanni Cuzco  
**Presidente del Tribunal**

EDGAR  
GIOVANNY  
CUZCO SILVA

Digitally signed by EDGAR  
GIOVANNY CUZCO SILVA  
DN: c=EC, o=BANCO CENTRAL  
DEL ECUADOR, ou=ENTIDAD DE  
CERTIFICACION DE  
INFORMACION ECIICE, l=QUITO,  
serialNumber=0000431517,  
cn=EDGAR GIOVANNY CUZCO  
SILVA  
Date: 2022.01.27 17:07:49 -05'00'


.....  
**Firma**

Dr. Klever Torres  
**Miembro del Tribunal**

 Firmado electrónicamente por:  
**KLEVER HERNAN  
TORRES  
RODRIGUEZ**

.....  
**Firma**

Mgs. Alejandra Pozo  
**Miembro del Tribunal**

 Firmado electrónicamente por:  
**ALEJANDRA DEL  
PILAR POZO  
JARA**

.....  
**Firma**

## **DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA**

En calidad de tutor del tema de investigación **“MODELADO Y EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO DE TRES TÉCNICAS DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS EN UNA RED CELULAR 5G CON NETWORK SLICING”** realizado por el Sr. Estudiante **Edinson Darío Sozoranga Valarezo**, para optar por el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sustentada públicamente y evaluada por el jurado examinador que se designe.

Riobamba, 16 de enero de 2022



Firmado electrónicamente por:  
**LUIS PATRICIO  
TELLO OQUENDO**

.....  
Ing. Luis P. Tello Oquendo, PhD.

C.I 060423524-2

**TUTOR**

## AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La responsabilidad del contenido de este proyecto de graduación corresponde exclusivamente a **Edinson Darío Sozoranga Valarezo, Luis P. Tello Oquendo, Ph.D.** y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.



.....  
Edinson Darío Sozoranga Valarezo  
C.I. 070591286-3

## **DEDICATORIA**

*El presente trabajo de investigación está dedicado principalmente a mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, a mis hermanas y a mi querida novia Diana por el apoyo dado durante toda la carrera universitaria, siendo el pilar fundamental para poder realizar este sueño y poder cumplir las metas trazadas, dándome fuerza y soporte para seguir adelante y jamás rendirme.*

**Edinson Darío Sozoranga Valarezo**

## **AGRADECIMIENTO**

*Quiero empezar dando las gracias a Dios por permitirme tener y disfrutar a mi familia, gracias a mi familia por el apoyo brindado a lo largo de toda la carrera universitaria, gracias a la vida que en sus distintas pruebas me demuestra lo hermosa y justa que puede llegar a ser, gracias a mis estimados docentes de mi querida universidad que a lo largo de la carrera cada uno colaboro con sus conocimientos para irme forjando en el profesional que soy gracias a ellos hoy este largo camino deja de ser un sueño y hoy es una realidad.*

*Mi gratitud eterna también a la Facultad de Ingeniería y al asesor de mi tesis, Ing. Luis Tello, por su apoyo incondicional, por su paciencia y todas las enseñanzas brindadas a lo largo del desarrollo de esta investigación.*

***Edinson Sozoranga***

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
RESUMEN .....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I .....	3
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1.1. PROBLEMA Y JUSTIFICACION. ....	3
1.2. OBJETIVOS.....	5
1.2.1. OBJETIVO GENERAL .....	5
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
CAPÍTULO II.....	6
2. ESTADO DEL ARTE.....	6
2.1. ANTECEDENTES .....	6
2.2. NETWORK SLICING .....	7
2.3. (RADIO ACCESS NETWORK, RAN), RED DE ACCESO DE RADIO .....	7
2.4. 5G CORE NETWORK.....	7
2.6. ESCENARIOS EN EL QUE SE DESARROLLA 5G NETWORK SLICING. ....	8
2.6.1. EMBB (BANDA ANCHA MÓVIL MEJORADA).....	8
2.6.2. COMUNICACIONES ULTRA CONFIABLES Y DE BAJA LATENCIA ( <i>Ultra Reliable and Low Latency Communications, URLLC</i> ).....	9
2.6.3. COMUNICACIONES MASIVAS TIPO MÁQUINA ( <i>Massive Machine-type Communications, MMTc</i> ) .....	9
2.7. SCHEDULING: ASIGNACIÓN DE RECURSOS.....	10
2.7.1. EFICIENCIA DE PARETO .....	12
2.7.2. HOMOTETICIDAD.....	13
2.8. REGIÓN DE CAPACIDAD .....	13
2.9. REDES ALÁMBRICAS .....	13
2.10. DIVISIÓN DEL TRÁFICO.....	14
2.11. REDES INALÁMBRICAS .....	15
2.12. LÍMITES DE TASA DE FLUJO .....	16
2.13. CARACTERÍSTICAS DE TRÁFICO .....	17
2.14. RENDIMIENTO DE FLUJO .....	17

2.15. DURACIÓN MEDIA DEL FLUJO .....	17
2.16. TASA INSTANTÁNEA MEDIA .....	18
2.17. EQUIDAD MÁXIMA-MÍNIMA .....	18
2.18. EQUIDAD PROPORCIONAL .....	19
2.19. EQUIDAD EQUILIBRADA.....	20
CAPITULO III.....	21
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	21
3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN .....	21
3.1.1. INVESTIGACIÓN EXPLORATORIA .....	21
3.2. MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN .....	21
3.2.1. MÉTODO ANALÍTICO .....	21
3.2.2. MÉTODO DESCRIPTIVO .....	21
3.3. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	22
3.3.1. OBSERVACIÓN.....	22
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA .....	22
3.4.1. POBLACIÓN .....	22
3.4.2. MUESTRA.....	22
3.5. FUENTES DE INFORMACIÓN.....	22
3.6. INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.....	23
3.7. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES .....	23
3.8. PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS .....	24
CAPÍTULO IV.....	27
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	27
4.1. RESULTADOS PARA LA CLASE 1 CUANDO SE TIENE 5 PERFILES DE TRANSMISIÓN ( $C1 = 5$ ) CONSIDERANDO TODA LA INTENSIDAD DE TRÁFICO. 27	
4.2. RESULTADOS PARA LA CLASE 2 CUANDO SE TIENE 1 PERFIL DE TRANSMISIÓN ( $C2 = 1$ ) CONSIDERANDO TODA LA INTENSIDAD DE TRÁFICO. 29	
4.3. RESULTADOS OBTENIDOS COMO UNA FUNCIÓN DE LA INTENSIDAD DEL TRÁFICO $\rho_1 = \rho_2$ CUANDO $C1 = \{5, 10, 15, 20\}$ , Y $C2 = 1$ .....	30
4.4. RELACIÓN DE MEJORA, COMPARACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS.....	32
4.5. ANÁLISIS INFERENCIAL (PRUEBA DE HIPÓTESIS).....	33



CAPÍTULO V .....	39
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	39
5.1. CONCLUSIONES.....	39
5.2. RECOMENDACIONES .....	41
BIBLIOGRAFÍA .....	42
ANEXOS .....	44

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Banda ancha móvil mejorada (Enhanced Mobile Broadband, eMBB).....	8
Figura 2.- URLLC (Comunicación ultra confiable y de baja latencia).....	9
Figura 3.- Comunicaciones masivas tipo máquina .....	9
Figura 4.- Conjunto de enlaces de capacidad limitada que es asignada a los usuarios.....	10
Figura 5. Descripción de una red lineal con su respectiva región de capacidad.....	14
Figura 6. Descripción de una red de árboles y su respectiva región de capacidad. ....	14
Figura 7. Una red alámbrica con división de tráfico y su región de capacidad. ....	15
Figura 8. Un punto de acceso inalámbrico de tiempo compartido y su región de capacidad..	16
Figura 9. Procedimiento para análisis y obtención de resultados. ....	25
Figura 10. Descripción de una estación base operando con dos clases (tiempo compartido).	25
Figura 11. Resultados mediante la configuración para clase 1 cuando se implementan 5 perfiles de transmisión. ....	28
Figura 12. Resultados para la clase 2 cuando se implementa un perfil de transmisión. ....	29
Figura 13. Resultados empleando una misma intensidad de tráfico tanto para la Clase 1 como para la Clase 2 y empleando distintos perfiles de transmisión cuya variación va desde el 1 a 20 para la Clase 1.....	30
Figura 14. Resultados empleando una misma intensidad de tráfico tanto para la clase1 como para la clase 2 y empleando 1 perfil de transmisión para la Clase 2 .....	31
Figura 15. Relación de mejora Proportional / Balanced fairness aplicada a la clase 1 en función de distintas intensidades tráfico y distintos perfiles de transmisión. ....	32
Figura 16. Relación de mejora Proportional, Balanced fairness aplicada a la clase 1 en función de distintas intensidades tráfico y distintos perfiles de transmisión. ....	33
Figura 17.- Diagrama de flujo de procedimientos a realizar para las distintas pruebas de hipótesis .....	34

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales fuentes de información en bases de datos científicas.....	22
Tabla 2. Operacionalización de las variables.....	23
Tabla 3. Resultados obtenidos de las medias en función a las diferentes técnicas de asignación de recursos. ....	35
Tabla 4. Resultados de los parámetros de la prueba de hipótesis para las técnicas Proportional Fairness y Max – Min Fairness.....	36
Tabla 5. Resultados de los parámetros de la prueba de hipótesis para las técnicas Balanced Fairness y Max – Min Fairness.....	36
Tabla 6. Resultados de los parámetros de la prueba de hipótesis para las técnicas Proportional Fairness y Balanced Fairness.....	37
Tabla 7.- Tabla de valores de Porporcional fairness (g1pf), Balanced fairness(g1Bf) y Max-min fairness(g1Mm) en referencia a Flow throughput y total traffic intensity(e), cuando se tiene una clase con 5 perfiles de transmisión.....	44
Tabla 8.-Tabla de valores de Porporcional fairness/Balanced fairness(g1p) y Max-min fairness(g1Mm) en referencia a Flow throughput y total traffic intensity(e), cuando se tiene una clase con 1 perfiles de transmisión.....	44
Tabla 9.-Tabla de valores de Porporcional fairness en referencia a Flow throughput y total traffic intensity(e), cuando se tiene la clase 1 con 10 perfiles de transmisión.....	44
Tabla 10.-Tabla de valores de Proportional fairness en referencia a Flow throughput y total traffic intensity(e), cuando se tiene la clase 1 con 10 perfiles de transmisión.....	45
Tabla 11.- Tabla de valores de Max-min fairness (g1Mm) en referencia a Flow throughput y total traffic intensity(e), cuando se tiene la clase 1 con 10 perfiles de transmisión.....	45

Tabla 12.-Tabla de valores de Porportional fairness/Balanced fairness( $g1p$ ) en referencia a Flow throughput y total traffic intensity( $e$ ), cuando se tiene la clase 2 con 10 perfiles de transmisión.....45

Tabla 13.- Tabla de valores obtenidos de Max-min fairness ( $g1Mm$ ) en referencia a Flow throughput y total traffic intensity( $e$ ), cuando se tiene la clase 2 con 10 perfiles de transmisión .....46

Tabla 14.- Tabla de valores obtenidos de Proportional fairness/Balanced fairness( $g1p$ ) en referencia a Flow throughput y total traffic intensity( $e$ ), cuando se tiene la clase 1 con 5,10,15,20 perfiles de transmisión .....46

Tabla 15.- Tabla de valores de Max-min fairness( $g1Mm$ ) en referencia a Flow throughput y total traffic intensity( $e$ ), cuando se tiene la clase 1 con 5,10,15,20 perfiles de transmisión....47

## RESUMEN

Las redes 5G al igual que las redes LTE utilizan diferentes tipos de algoritmos de asignación de recursos para distribuir los bloques de recursos de radio disponibles entre los equipos de usuario según la demanda de estos. Diversos parámetros se toman en cuenta dentro de los algoritmos de asignación de recursos para la distribución de los recursos entre los que se destacan la calidad del canal de radio, la equidad en la asignación de recursos y el *throughput* que es considerado como el número real de bits que fluye a través de una conexión de red en un tiempo determinado.

En este estudio se analizan tres algoritmos de asignación de recursos empleados en redes 5G, siendo estos equidad proporcional, equidad balanceada y equidad max-min. Se implementó un modelo de simulación en el software MATLAB para estudiar estos algoritmos y se describen los resultados alcanzados por estos en cuanto a la tasa de transmisión de datos del sistema.

En base a los resultados se comprueba que la asignación de recursos a través de óptimas programaciones tanto para equidad proporcional y equidad equilibrada es una buena aproximación a cargas elevadas en todos los casos, debido a que la equidad Max-min da una prioridad absoluta a los flujos con velocidades de bits pequeñas. Sin embargo, en las redes inalámbricas esto da como resultado una asignación ineficiente donde los flujos que experimentan malas condiciones de radio consumen la mayoría de los recursos de red.

**Palabras claves:** *Network Slicing*, Asignación de recursos, *Throughput*.

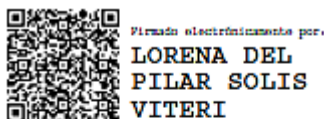
## ABSTRACT

5G networks, like LTE networks, use different resource allocation algorithms to distribute the available radio resource blocks among user equipment according to their demand. Various parameters are considered within the resource allocation algorithms for the resource distribution. Among the most important are the radio channel quality, equity in resource allocation, and the throughput that is considered the actual number of bits that flow through a network connection during a specified time.

This study analyzes three algorithms of resource allocation used in 5G networks, namely proportional fairness, balanced fairness, and max-min fairness. A simulation model in MATLAB software was devised to study these algorithms, and their results are described in terms of the system's data transmission rate.

Based on the results, it is verified that allocating resources through optimal programming for both proportional fairness and balanced fairness is an excellent approximation to high loads in all cases since Max-min fairness gives absolute priority to the streams with low bit rates. However, this results in inefficient allocation in wireless networks where flows experiencing poor radio conditions consume most network resources.

**Keywords:** Network Slicing, Resource Allocation, Throughput.



Reviewed by:

Mgs. Lorena Solís Viteri

ENGLISH PROFESSOR

c.c. 0603356783

## INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios, la comunicación entre las personas nos ha llevado a compartir e intercambiar ideas, y a lo largo de la historia han surgido y evolucionado diferentes formas de comunicación según distintas necesidades, lo que se ha traducido en la mejora de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) [1].

Los avances más relevantes dentro de este precipitado proceso se encuentra el desarrollo de la informática portátil y las comunicaciones móviles el cual es muy importante su implantación. La conjunción de ambos factores permite a los usuarios acceder a una red en cualquier momento y lugar, aun cuando se encuentren en movimiento [2].

El crecimiento constante y rápido de la industria de las comunicaciones inalámbricas de banda ancha móvil hasta la quinta generación (5G) está impulsado por la creciente demanda de una capacidad mejor y mejores velocidades de transmisión (*throughput*, definido como la cantidad de información útil que puede transmitirse por unidad de tiempo), [3] y, en otros casos, por el acceso inalámbrico que conectará de manera transparente a los usuarios [4].

Existe un consenso de que los sistemas 5G puedan implementarse alrededor de 2020. Se espera que estos sistemas brinden a la sociedad una conexión convergente, que puede romper las limitaciones de tiempo y espacio para crear interconexiones centradas en el usuario o centradas en el servicio entre personas y las cosas [5].

Las redes 5G tienen como objetivo cumplir con varios requisitos de calidad de servicio (QoS, por sus siglas en inglés) del usuario en diferentes escenarios de aplicación (en términos de velocidad de transmisión de datos y latencia) [6]. En ciertos escenarios se presentan problemas con la cobertura de área amplia, los sistemas 5G deberían proveer a los usuarios servicios de alta velocidad de datos sin interrupciones en cualquier momento y en cualquier lugar, incluso con movilidad de alta velocidad (hasta 500 km/h). Las redes 5G también deberían proporcionar una cobertura de puntos de acceso densa con alta capacidad en escenarios donde se necesitan conexiones confiables de una gran cantidad de nodos de baja potencia (por ejemplo, sensores inalámbricos). Además, deberían poder conectar millones de dispositivos bajo las restricciones de consumo de energía y costo por dispositivo [7].

Este tipo de red está construida con una arquitectura que admitirá la cartera de servicios de las Comunicaciones Ultra Confiables de Baja Latencia (*Ultra Reliable Low Latency*

*Communications*, URLLC). URLLC será responsable de admitir algunos servicios avanzados para los dispositivos que se conectarán, que son sensibles a la latencia para permitir la entrada de aplicaciones. en un amplio espectro, tales como automatización de fábricas, conducción autónoma, Internet industrial y red eléctrica inteligente [8].

Frente a la gran cantidad y heterogeneidad de requerimientos de los distintos servicios y en los nuevos escenarios de aplicación mencionados anteriormente, la arquitectura de red y las tecnologías de red deben revisarse para los sistemas 5G [9].

Esto se ha convertido en el foco de las actividades de investigación y desarrollo de operadores, vendedores de equipos e institutos de investigación en todo el mundo. Con el fin de proporcionar servicios confiables personalizados utilizando recursos de red limitados mientras se reducen los gastos de capital y los gastos operativos de las redes 5G, la industria inalámbrica ha propuesto el *network slicing* como un habilitador principal de convergencia de servicios de red y servicios personalizados [10].

La segmentación de la red (*network slicing*) permite a los operadores de redes móviles administrar y operar múltiples redes virtuales en una infraestructura de red física común. Esta segmentación o fragmentación hace posible una partición virtual de la red de acceso por radio (RAN), los componentes de red centrales de *Evolved Packet Core* (EPC) desde redes de conmutación y agregación hasta centros de datos donde se accede al contenido y las aplicaciones.

Los segmentos o fragmentos se caracterizan por casos de uso en particular que permite el desempeño de la red en base a parámetros relacionados a medidas como capacidad, latencia, seguridad, duración, confiabilidad y cobertura geográfica, por mencionar unos cuantos [11].

La asignación de recursos desarrolla un papel fundamental, ya que con una óptima asignación se pretende llegar a los límites cercanos a la máxima capacidad dentro de un sistema.; sin embargo, si la asignación de recursos radio no es adecuada, esta capacidad del sistema estará subutilizada y, por lo tanto, el desempeño de la red será bajo.



# CAPÍTULO I

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1.1. PROBLEMA Y JUSTIFICACION.

Como regla general, se dice que una asignación de recursos es óptima si maximiza la "utilidad" general de un conjunto dado de usuarios, donde la utilidad de cada usuario es alguna función cóncava de la velocidad de bits asignada a ese usuario. En redes reales, los flujos de datos no duran para siempre, sino que llegan en momentos aleatorios y abandonan la red una vez que han hecho el uso correspondiente. Esto da como resultado un conjunto aleatorio y dinámico de usuarios activos que afecta la velocidad de bits que se puede asignar a cada uno de ellos.

Por el contrario, la velocidad de bits asignada a cada usuario determina cuánto tiempo permanecerá activo ese usuario y, por lo tanto, afecta la evolución del conjunto de usuarios activos. Entonces, el estudio de la asignación de recursos no se puede desacoplar del proceso estocástico que describe el conjunto de usuarios activos. Los recursos se pueden asignar de forma diferente para cada canal de la red; al configurar los canales de la red, se puede asignar más recursos a un canal donde el tráfico de la red es más pesado para que los recursos se distribuyan de acuerdo con las necesidades reales, de esta manera se aumenta la eficiencia del sistema para procesar paquetes. Esto se puede ilustrar mejor con un ejemplo que se detalla a continuación.

Considere un sistema inalámbrico donde una estación base transmite datos a teléfonos móviles que experimentan condiciones de radio constantes que pueden clasificarse como "buenas" o "malas". Los dispositivos móviles que experimentan malas condiciones de radio requieren más recursos de radio (por ejemplo, ancho de banda, potencia de transmisión, entre otros) que los otros dispositivos móviles para obtener la misma velocidad de bits. Por lo tanto, la tasa de bits global se maximiza asignando todos los recursos a los dispositivos móviles que tienen un amplio canal de radio. Sin embargo, dicha asignación no es "eficiente". Sería mucho más "equitativo" maximizar las tasas de bits mínimas (la llamada equidad máxima-mínima). Pero la mayoría de los recursos son consumidos por esos dispositivos móviles que no tienen un adecuado canal de radio. Vemos que existe una compensación entre "eficiencia" y "equidad", que se refleja en las asignaciones de maximización de servicios mencionadas anteriormente. Un ejemplo bien conocido es la equidad proporcional, obtenida con una función de utilidad logarítmica.

Teniendo en cuenta el hecho de que el número de dispositivos móviles activos es dinámico, entonces no está claro qué es una asignación de recursos "óptima". Maximizar la tasa de bits general en cada estado priva a los dispositivos móviles que experimentan malas condiciones de radio. Dichos dispositivos, que se sirven solo en ausencia de dispositivos móviles con buenas condiciones de radio, permanecen más tiempo en el sistema. Esto da como resultado un estado estable donde la mayoría de los dispositivos móviles activos tienen malas condiciones de radio. Por el contrario, la equidad máxima-mínima proporciona relativamente pocos recursos a los dispositivos móviles con buenas condiciones de radio, lo que da como resultado un número innecesariamente elevado de tales dispositivos en estado estacionario. Vemos que el rendimiento de una asignación depende de manera crítica del estado estable al que conduce. La aparente compensación entre "eficiencia" y "equidad" desaparece.

Se puede argumentar que los recursos de red deberían asignarse más bien para minimizar la duración media de las transferencias de datos. Sin embargo, dicha asignación "óptima" puede depender de características de tráfico detalladas como la distribución de volúmenes de transferencia de datos. Un objetivo más interesante en la práctica es asignar recursos de tal manera que el estado estable no dependa de estas características de tráfico, lo que hace que el rendimiento sea robusto con respecto al comportamiento del usuario [12].

En el desarrollo de esta tesis se pretende comparar el rendimiento de tres técnicas específicas de asignación de recursos: la equidad máxima-mínima, la equidad proporcional y la equidad equilibrada. Para el análisis se definirá y modelará un escenario de red celular 5G que implementa *network slicing*, es decir, un entorno dinámico con un número variable aleatorio de flujos de datos en curso y recursos compartidos. El análisis se realizará mediante un modelo simulación en Matlab en el que se implementarán estas tres técnicas de asignación de recursos, se las comparará en base al *throughput* del sistema propuesto y se determinará cuál es la técnica más adecuada a utilizar en el escenario de red definido.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

Modelar y evaluar el rendimiento de tres técnicas de asignación de recursos en una red celular 5G con *network slicing*.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir un modelo de sistema de red de acceso radio 5G que implementa *network slicing* (es decir, una topología cuyos recursos son compartidos por un número aleatorio de flujos de datos).
- Modelar e implementar tres técnicas de asignación de recursos: equidad máxima, equidad proporcional y equidad equilibrada en el sistema previamente definido.
- Analizar el rendimiento, en términos de *throughput*, de cada una de las técnicas de asignación de recursos en el modelo del sistema a través de simulaciones.
- Evaluar y determinar qué técnica es la más adecuada a utilizar en el modelo de sistema propuesto.

## CAPÍTULO II

### 2. ESTADO DEL ARTE

#### 2.1. ANTECEDENTES

Diferentes investigaciones nos muestran la importancia de *network slicing* dentro de las redes actuales. El CTO de Ericsson, Ulf Ewaldsson, dice que el éxito de la segmentación de la red será de suma importancia para que las redes sirvan como una plataforma innovadora para nuevos tipos de aplicaciones que cumplan con las expectativas [13].

Según un artículo publicado por la empresa GSMA, los operadores de redes móviles podrían implementar un solo tipo de *network slicing* que cumpla con las necesidades de mercados verticales, así como múltiples segmentos de red de diferentes tipos que se empaquetan como un solo producto dirigido a clientes comerciales (un paquete comercial) que tienen múltiples y diversos requisitos (por ejemplo, un vehículo puede necesitar simultáneamente un segmento de alto ancho de banda para información y entretenimiento y un segmento ultra confiable para telemetría, conducción asistida) [14].

La segmentación de red 5G es el concepto de crear múltiples redes virtuales en una infraestructura física común que garantiza un *service level agreement* (SLA) acordado para la funcionalidad específica solicitada a diferentes proveedores de servicios o inquilinos. La segmentación de red es una tecnología que permite proporcionar los requisitos de servicio generalizados para casos de uso industrial emergentes.

Un artículo publicado por la revista Samsung menciona que, con 5G discutido activamente en todas partes, *network slicing* ciertamente es una de las tecnologías más discutidas en estos días. Los operadores de red como KT, SK Telecom, China Mobile, DT, KDDI y NTT, y también proveedores como Ericsson, Nokia y Huawei lo reconocen como una arquitectura de red ideal para la próxima era 5G [15].

Esta nueva tecnología permite a los operadores dividir una red física en redes múltiples, virtuales, de extremo a extremo (E2E), cada una aislada lógicamente incluyendo dispositivo, acceso, transporte y red central (como particionar un HDD en unidades C y D) y dedicado para diferentes tipos de servicios con diferentes características y requisitos.

Para cada segmento de red, se garantizan recursos dedicados (como recursos dentro de servidores virtualizados, ancho de banda de red, QoS, entre otros); como los segmentos están aislados entre sí, un error o falla en un segmento no causa ningún efecto en la comunicación en otros segmentos.

## **2.2. NETWORK SLICING**

Es una forma de arquitectura de red virtual que se basa en los mismos principios que una red definida por software (*software-defined networks*, SDN) y la virtualización de las funciones de red (*network function Virtualization*, NFV) en redes fijas. SDN y NFV se implementan para proporcionar una mayor flexibilidad de red al permitir que las arquitecturas de red tradicionales se dividan en elementos virtuales. que se pueden vincular a través de software [16].

## **2.3. (RADIO ACCESS NETWORK, RAN), RED DE ACCESO DE RADIO**

La red de acceso de radio da la facilidad de que los dispositivos individuales se puedan interconectar con otras partes de una red mediante una conexión de radio [17]. La red de acceso de radio está presente en un equipo terminal del usuario, como un teléfono móvil, una computadora o cualquier máquina controlada remotamente, y proporciona la conexión con su red principal. La red de acceso de radio ha ido evolucionando en las diferentes plataformas que conducen a la tecnología 5G [8]. Una estación base y antenas que cubren cierta región dada dependiendo de su capacidad, junto con otros elementos de red centrales requeridos integran la RAN [18].

## **2.4. 5G CORE NETWORK**

El *Evolved Packet Core* (EPC) de la arquitectura 5G Core Network (5GC) se basa en ciertas con mejoras en sus tres áreas, tales como: arquitectura basada en servicios, soporte para la segmentación de la red y división /desacoplo entre el plano de control (CP) y plano de datos (DP) [19].

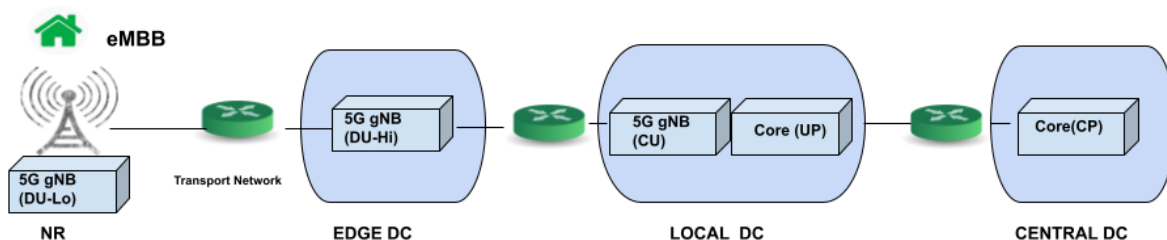
La arquitectura del núcleo 5G está basada en servicios. Esto significa que la especificación se centra en los servicios y las funcionalidades proporcionadas por la red central, en lugar de los nodos como tales. La red central hoy en día ya se encuentra altamente virtualizada con la funcionalidad de red central que se ejecuta en hardware genérico. Uno de los objetivos principales de la arquitectura 5G es cumplir de manera eficiente y flexible los requisitos de servicios móviles diversificados [20].

## 2.5. RED 5G Y TRANSICIÓN CON LTE

La red 5G con el avance del creciente mercado de negocios, industrial y de consumo en general plantea cumplir con diversos objetivos entre los que se destaca la baja latencia y alta fiabilidad en las comunicaciones, gran densidad de usuarios por área con capacidad de tráfico  $10\text{Mbps}/\text{m}^2$ , con un alcance de velocidades de 10Gbps y dependiendo de los escenarios se puede llegar a 20 Gbps, el servicio no se verá afectado aun cuando el usuario vaya moviéndose a velocidades de hasta 500km/h, la densidad para las conexiones será de  $10^6$  por  $\text{km}^2$ , la eficiencia espectral comparada con 4G, en 5G es tres veces mejor [21].

## 2.6. ESCENARIOS EN EL QUE SE DESARROLLA 5G NETWORK SLICING.

### 2.6.1. EMBB (BANDA ANCHA MÓVIL MEJORADA)



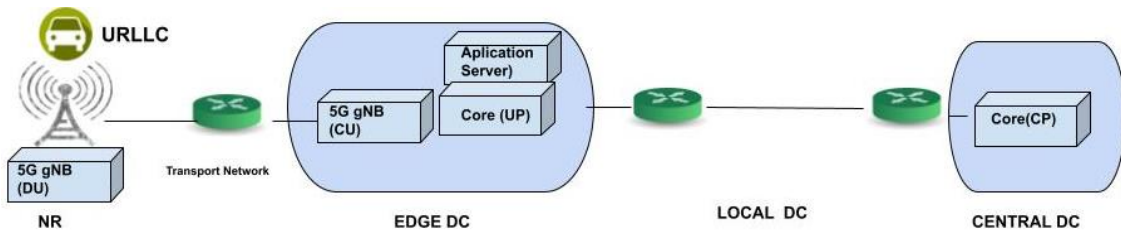
*Figura 1.- Banda ancha móvil mejorada (Enhanced Mobile Broadband, eMBB).*

*Fuente: Autor*

La banda de ancho mejorada (eMBB) se encarga de soportar la transmisión de datos entre los usuarios finales y la capacidad de los sistemas, ambos en aumento constante. Para satisfacer este requerimiento, la eMBB introduce dos mejoras tecnológicas importantes [22]:

- Espectro de frecuencia, cambiando el rango de onda centimétrica a onda milimétrica con esto se obtendrá unas asignaciones de banda mucho mayores.
- Inserción de decenas o incluso de centenares de antenas para Tx/Rx para permitir el MIMO masivo y la formación de haz.

### 2.6.2. COMUNICACIONES ULTRA CONFIABLES Y DE BAJA LATENCIA (*Ultra Reliable and Low Latency Communications, URLLC*)



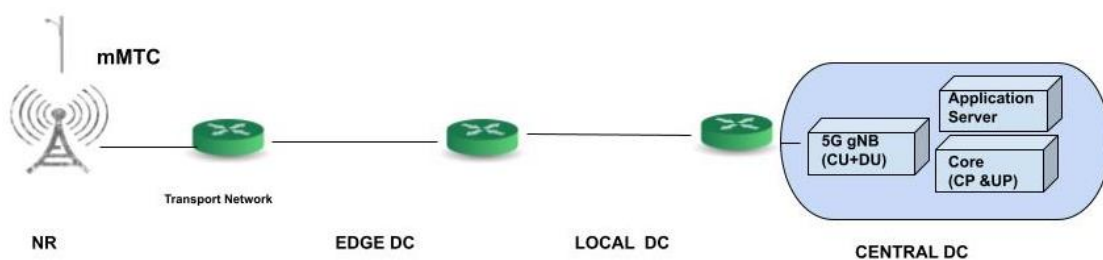
**Figura 2.- URLLC (Comunicación ultra confiable y de baja latencia).**

*Fuente: Autor*

En esta categoría se sitúan todas aquellas aplicaciones de la tecnología 5G, las cuales necesitan altos requerimientos como es la confiabilidad y disponibilidad de las comunicaciones, y además de la baja latencia en la transferencia de información.

URLLC admitirá un conjunto de servicios optimizados para dispositivos conectados sensibles a la latencia para permitir una amplia gama de aplicaciones, como automatización de fábricas, conducción autónoma, Internet industrial y redes inteligentes [22].

### 2.6.3. COMUNICACIONES MASIVAS TIPO MÁQUINA (*Massive Machine-type Communications, MMTC*)



**Figura 3.- Comunicaciones masivas tipo máquina**

*Fuente: Autor*

mMTC juega un papel importante en las comunicaciones de IoT, permitiendo que surja una gama cada vez más diversa de medios. Debido a que los tamaños de los paquetes y las velocidades de transmisión pueden variar mMTC facilitará la eficiencia y la flexibilidad.

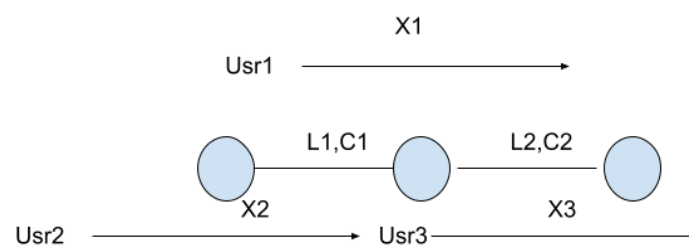
Así, el principal desafío para mMTC es la gestión de una gran cantidad de dispositivos conectados descoordinados, a diferencia de las redes celulares actuales, que están diseñadas para para transmisiones de voz perfectamente coordinadas y transferencia de información de una forma homogénea [23].

## 2.7. SCHEDULING: ASIGNACIÓN DE RECURSOS

A razón de que este proyecto se enfoca en el *scheduling* o asignación de recursos se debe tener muy en claro y establecer ciertos conceptos ya que aparecerá a lo largo de este documento.

El problema de asignación de recursos también se lo ve en economía donde dichos recursos son escasos, en estos contextos aparecen los conceptos de “justicia” y “eficiencia”. Debido a que los usuarios son iguales, el reparto en cantidades iguales no necesariamente significa justicia. En los algoritmos de asignación de recursos lo que se busca es maximizar dicha función [24].

En cuestión de asignación de recursos y para plantear el problema de optimización asociado, se define la función de utilidad  $U_i(x_i)$ . Esta busca representar la conformidad del usuario  $i$  (del conjunto de  $N$  usuarios) respecto a los recursos asignados  $x_i$ , que podrían ser cualquier cosa que sea de utilidad para los usuarios. [24].



**Figura 4.-** Conjunto de enlaces de capacidad limitada que es asignada a los usuarios.

**Fuente (Autor).**

( $x_1, x_2, x_3$ ): Tasa asignada.

L1, L2: Enlaces de una red.

C1, C2: Capacidad de red en cada enlace



Frank Kelly fue uno de los pioneros en publicar estudios acerca de la asignación de recursos en una red lineal de varios enlaces como en la Figura 4; Kelly plantea el problema de la maximización de la utilidad de las tarifas de los usuarios. Un supuesto importante al estudiar el problema es que los usuarios tienen un tipo de tráfico conocido como tráfico elástico. Este es un tipo de tráfico que reacciona a los cambios en la red, es capaz de adaptar su servicio a diferentes asignaciones de recursos o rendimiento, brindando comodidad a los usuarios, a pesar de que podría ser mayor.

$$\max_x \sum_{i=1}^N U_i(x_i) \quad (1)$$

Sujeto a:

$$x \in C \quad (2)$$

$$x \geq 0$$

Donde  $C$  es la región de capacidad en la que vive  $x$ , estas restricciones son lineales y representan la capacidad de cada enlace. La región que definen sus ecuaciones es convexa. Por ejemplo, en el grafo de la Figura 4 las restricciones serían  $x_1 + x_2 \leq C_1$  y  $x_1 + x_3 \leq C_2$ , y se puede ver que es una región convexa. De aquí es fácil ver que agregar enlaces y usuarios no hace que las restricciones dejen de ser una región convexa. Este problema tiene solución factible siempre y cuando la región definida por  $x$  sea convexa y las funciones de utilidad sean estrictamente cóncavas.

La optimización de Pareto es un criterio, ya que con  $x$  asignación de recursos, no es posible aumentar la asignación a un usuario sin disminuir el recurso para el otro.

*Max-min fairness* el método de asignación de recursos más básico es que un vector de asignaciones  $x = (x_i: i = 1, \dots, N)$  factible ( $x \in C$  y  $x \geq 0$ ) es *max-min fairness* si hay al menos dos usuarios  $i$  e  $i^*$  ( $i, i^* \in 1, \dots, N$ ) con:

$$x_i > x_{i^*} \quad (3)$$

Para cumplir con el principio de asignación de recursos *max-min fairness* es subiendo las tasas de forma imparcial hasta que uno de ellos llegue a su máximo, aplicando lo mismo para el resto y así sucesivamente hasta alcanzar la capacidad máxima (water filling). Así de esta manera la única forma de seguir aumentando las tasas es quitándosela a otro que tiene menos, debido a

que ya alcanzaron su máximo. Si se aplica este algoritmo al problema de la Figura 4 se obtiene que  $x_1 = 0,5$ ,  $x_2 = 0,5$  y  $x_3 = 1,5$ . Este es un criterio que prioriza a los usuarios con tasas menores sin importar la diferencia entre los mismos, dado que si se cumple la ecuación (3), ningún incremento en  $x_i$  podrá compensar el decremento en  $x_{i^*}$ . Esto significa que este criterio no considera la proporción entre cuánto se beneficia el usuario  $i$  y cuanto se perjudica  $i^*$ .

Otro criterio a favor de los usuarios desfavorecidos mencionado por Kelly en las publicaciones es lo que se conoce como imparcialidad relativa. Un vector de asignaciones factible  $x = (x_i: i = 1, \dots, N)$ , es *Proportional fairness* si para cualquier otra asignación factible  $x^*$ , se cumple que:

$$\sum_{i=1}^N \frac{x_i^* - x_i}{x_i} \leq 0 \quad (4)$$

Entonces se podría decir que una asignación es *Proportional fairness* si se cumple que, para cualquier otra asignación, los cambios proporcionales respecto a la asignación original son menores o iguales a cero.

Dentro de la asignación de recursos se introducen dos propiedades importantes que son la eficiencia de Pareto.

### 2.7.1. EFICIENCIA DE PARETO

Se dice que una asignación de recursos es Pareto eficiente si todos los recursos son "consumidos" en el sentido de que la tasa de bits asignada a un flujo no se puede aumentar sin disminuir la tasa de bits asignada a otro flujo.

Se dice que la asignación es eficiente  $\phi$  sí para todos los estados  $x$ ; cualquier vector  $\varphi \in C(x)$ , tal que  $\varphi \geq \phi(x)$  no exista otro vector igual a  $\phi(x)$ .

Tenga en cuenta que la eficiencia de Pareto implica que  $\phi(x)$  pertenece al límite de la capacidad establecida en cualquier estado  $x$  [12].

### 2.7.2. HOMOTETICIDAD

Se dice que una asignación de recursos es homotética si al cambiar los recursos disponibles para una clase dada por algún factor cambia la tasa de bits asignada a esta clase por el mismo factor [12].

### 2.8. REGIÓN DE CAPACIDAD

Una red consta de  $l$  recursos, cada recurso puede representar la capacidad de un enlace inalámbrico, la banda de frecuencia o la potencia de transmisión de un enlace inalámbrico. Se denota por  $C_l$  la cantidad de recurso  $l$ . Un conjunto de datos aleatorios los flujos compiten por el acceso a estos recursos.

Considerando un número arbitrario de  $N$  clases de flujo de manera que todos los flujos dentro de la misma clase requieran el mismo recurso. Hay  $x_i$  flujos de clase- $i$  y nos referimos al vector de línea correspondiente  $x$  como el estado de la red. Cada flujo de clase- $i$  requiere una Cantidad de recurso  $l$  igual a  $A_{il}$  unidades por bit/s. Si el recurso  $l$  representa la banda de frecuencia de un enlace inalámbrico por cada flujo de clase- $i$  requiere  $A_{il}$  Hz por bit/s. Los Flujos  $x_i$  de la clase- $i$  comparten uniformemente una tasa de bits total de  $\phi_i$  bit / s. Denotamos por  $\phi$  el vector lineal correspondiente. La asignación debe satisfacer la desigualdad de componentes:

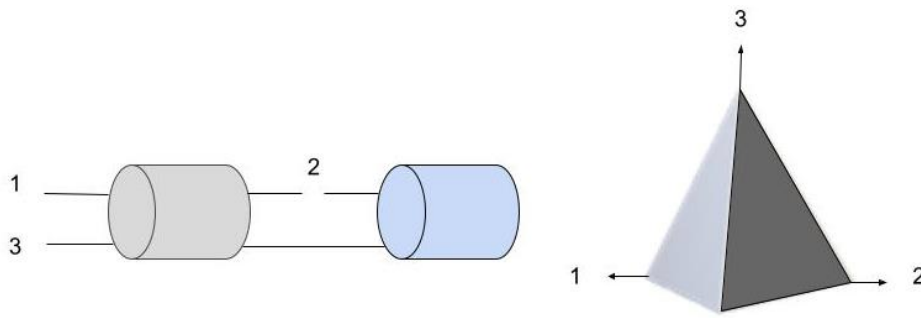
$$\phi A \leq C \quad (1)$$

Se conoce como región de capacidad al conjunto de vectores  $\phi$  que satisfacen esta desigualdad [12].

### 2.9. REDES ALÁMBRICAS

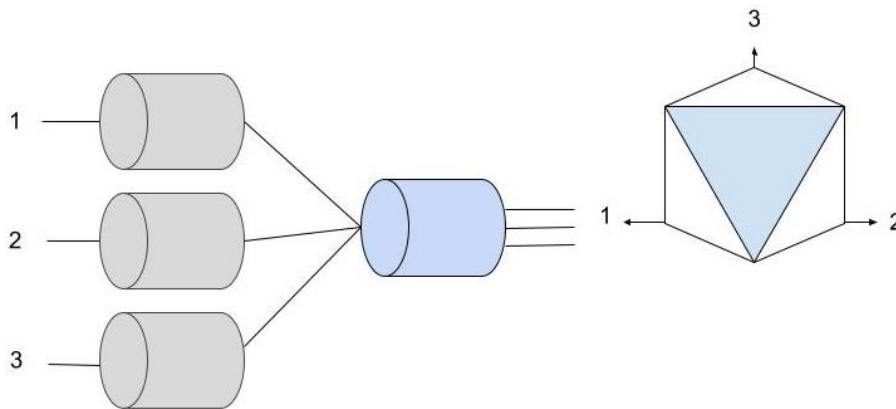
Considerando una red alámbrica que consta de  $L$  enlaces alámbricos, la capacidad del enlace denominada como  $l$  responde a la siguiente ecuación  $C_l$  bits/s. Si las unidades por bit/s es igual a uno ( $A_{il} = 1$ ) el flujo de clase- $i$  pasará por el enlace caso contrario si las unidades por bit/s es igual cero ( $A_{il} = 0$ ) el flujo de clase- $i$  no pasará por el enlace. En la Figura 2 y la Figura 3 se ilustran ejemplos simples de tales redes con su región de capacidad, respectivamente dado por:

$$\begin{cases} \phi_1 + \phi_3 \leq 1, \\ \phi_2 + \phi_3 \leq 1, \end{cases} \quad y \quad \begin{cases} \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \leq 2, \\ \phi_1 \leq 1, \phi_2 \leq 1, \phi_3 \leq 1, \end{cases} \quad (2)$$



**Figura 5.** Descripción de una red lineal con su respectiva región de capacidad.

**Fuente (Autor)**



**Figura 6.** Descripción de una red de árboles y su respectiva región de capacidad.

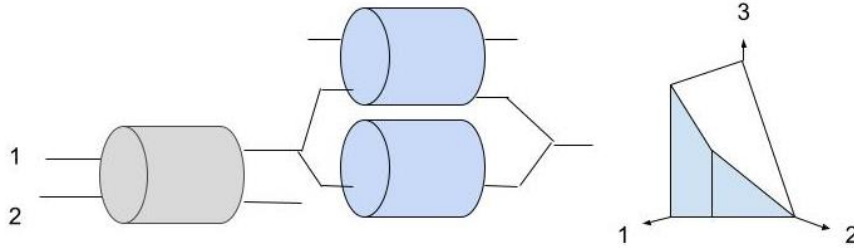
**Fuente (Autor)**

En la Figura 5 y la Figura 6 no se especifica las direcciones de los enlaces. En la Figura 5, por ejemplo, las direcciones de ambos enlaces pueden ser idénticas u opuestas. En el primer caso, todas las clases representan flujos habituales de punto a punto con una sola fuente y un solo destino, en el último caso, la clase 3 puede representar flujos de punto a multipunto con una única fuente, ubicada entre los dos enlaces, y dos destinos.

## 2.10.DIVISIÓN DEL TRÁFICO

Los esquemas de enrutamiento más complejos pueden estar representados por restricciones de capacidad lineal. Supongamos que, por ejemplo, el tráfico generado por cada clase se puede dividir en un conjunto predeterminado de rutas. La región de capacidad sigue siendo un polígono convexo, como se muestra en la Figura 7, para  $N=3$  clases donde el tráfico de clase 2 se divide en dos rutas. Si el enlace utilizado por los flujos de clase 3 tiene capacidad y los otros dos enlaces tienen capacidad  $\frac{1}{2}$ , obtenemos las restricciones de capacidad [25].

$$\phi_1 \leq \frac{1}{2}, \quad \phi_1 + \phi_2 \leq 1, \quad \phi_2 + \phi_3 \leq 1 \quad (3)$$



**Figura 7.** Una red alámbrica con división de tráfico y su región de capacidad.

*Fuente (Autor)*

## 2.11. REDES INALÁMBRICAS

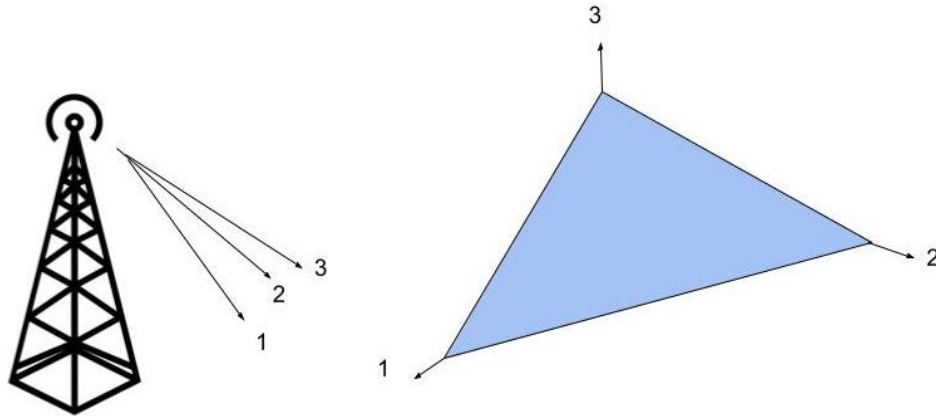
El modelado de redes inalámbricas es generalmente más difícil debido a la frecuencia conjunta asignación de banda y potencia involucrada en la transmisión. Considerando el caso simple de un punto de acceso inalámbrico que transmite datos a cada móvil activo uno a la vez, utilizando toda la banda de frecuencia y toda la potencia. Este esquema de multiplexación por división de tiempo se utiliza para el canal de enlace descendente de las redes celulares estándar de tercera generación. Debido a la corta duración del intervalo de tiempo (normalmente menos de 2 ms), el rendimiento de cada móvil de hecho depende principalmente de la fracción de intervalos que recibe, y no de la programación precisa del intervalo.

En este escenario, las limitaciones de capacidad del sistema también son lineales. Por ejemplo, supongamos que los móviles pueden utilizar un conjunto de  $N$  esquemas de modulación y codificación dependiendo de sus condiciones de radio. Aquí asumimos que las condiciones de radio experimentadas por cada móvil no cambian durante la transferencia de datos, por lo que cada flujo se transfiere con un esquema de codificación y modulación constante [25].

Nos referimos a los flujos de clase  $-i$  como aquellos flujos que utilizan el esquema de modulación y codificación  $i$ . Tales flujos tienen la tasa de bits  $C_i$  cuando se atiende, de modo que  $\phi_i/C_i$  es la fracción de tiempo que el punto de acceso sirve a un flujo de clase  $i$ . La restricción de capacidad viene dada por:

$$\frac{\phi_1}{C_1} + \frac{\phi_2}{C_2} + \dots + \frac{\phi_N}{C_N} \leq 1 \quad (4)$$

La Figura 5 ilustra esquemas de codificación y modulación cuando el número de clases de flujo es igual a tres ( $N = 3$ ) y la región de capacidad en función a un hiperplano.



*Figura 8. Un punto de acceso inalámbrico de tiempo compartido y su región de capacidad.*

*Fuente (Autor)*

## 2.12.LÍMITES DE TASA DE FLUJO

Además de las restricciones de capacidad global (Ecuación 1), los flujos pueden tener restricciones de tasa individuales, por ejemplo, a la velocidad de la línea de acceso del usuario en redes fijas o la limitación de potencia del móvil en las redes inalámbricas. Denotamos por  $\mathbf{a}_i > \mathbf{0}$  la restricción de velocidad de los flujos de clase  $i$  en bits/s. Sea  $\mathbf{a}_i = \infty$  si los flujos de clase  $i$  no tienen ninguna restricción de tasa individual.

Por lo tanto, la tasa de bits total de los flujos de clase  $i$  no pueden exceder  $x_i a_i$  en presencia de  $x_i$  flujos de clase  $i$ . Usando notación vectorial la asignación  $\boldsymbol{\phi}$  debe satisfacer la desigualdad adicional en cuanto a componentes.

$$\boldsymbol{\phi} \leq \mathbf{x}\mathbf{a} \quad (5)$$

Donde  $\mathbf{x}\mathbf{a}$  denota el vector  $N$ - dimensional cuyo  $i$ -enésimo componente es igual a  $x_i a_i$ . Tener en cuenta que estas restricciones de velocidad dependen del estado de la red  $x$ , y por lo tanto no puede ser escrito en forma de algunas limitaciones adicionales a la capacidad global (Ecuación 1).

### 2.13. CARACTERÍSTICAS DE TRÁFICO

Estamos interesados en el comportamiento del estado de la red  $x(t)$  que describe el número de flujos en curso de cada clase en el momento  $t$ . Esto depende tanto de la asignación de recurso y en las características del tráfico como el proceso de llegada del flujo y la distribución del tamaño del flujo de cada clase. Suponemos que el vector  $\phi$  de la tasa de bits asignada depende del estado de la red  $x$  solamente y satisface las restricciones de capacidad (Ecuación 1) y (Ecuación 2) en todos los estados. Equidad máxima-mínima, equidad proporcional y equidad equilibrada corresponden a funciones de asignación específicas  $\phi(x)$ .

### 2.14. RENDIMIENTO DE FLUJO

Asumiendo que el estado de la red  $x(t)$  es estacionario y ergódica e introducimos una medida de rendimiento, denominada rendimiento de flujo, que se puede derivar de su distribución estacionaria  $\pi$ . El rendimiento del flujo refleja la calidad de las transferencias de datos. como lo experimentan los usuarios en estado estable en los dos sentidos siguientes.

### 2.15. DURACIÓN MEDIA DEL FLUJO

La primera definición está relacionada con la duración media del flujo, específicamente el rendimiento de flujo se define como la relación entre el tamaño medio del flujo y la duración media del flujo. Nos referimos a la inversa del caudal de flujo, es decir, la relación entre la duración media del flujo y el tamaño medio del flujo, como el retardo por bit (en s / bit). Sea  $\tau_i$  el retardo por bit de los flujos de clase  $i$ , dado que el tamaño medio de los flujos de clase  $i$  es igual a  $\sigma_i \tau_i$  por definición. Denotamos por  $\bar{x}_i$  el número promedio de flujos de clase  $i$  en estado estacionario. Según la ley de Little tenemos:

$$\bar{x}_i = \lambda_i \times \sigma_i \tau_i = \rho_i \tau_i \quad (6)$$

Deducimos el rendimiento de flujo de la clase  $i$ :

$$\gamma_i = \frac{1}{\tau_i} = \frac{\rho_i}{\bar{x}_i} \quad (7)$$

## 2.16. TASA INSTANTÁNEA MEDIA

La segunda definición corresponde a la tasa instantánea media experimentada por los usuarios. Dado que la tasa de bits total asignada a los flujos de clase  $i$  se comparte uniformemente por estos flujos, la tasa de bits de un flujo de clase  $i$  es igual  $\phi_i(x)/x_i$  en cualquier estado  $x$  tal que  $x_i > 0$ . Ahora, la probabilidad de estado estable de que un flujo de clase  $i$  vea la red en el estado  $x$  es proporcional a  $x_i \pi(x)$  y, por lo tanto, igual a  $x_i \pi(x) / \bar{x}_i$ . Deducimos el flujo de rendimiento de la clase  $i$ :

$$\gamma_i = \sum_{x: x_i > 0} \frac{x_i \pi(x)}{\bar{x}_i} \frac{\phi_i(x)}{x_i} = \frac{1}{\bar{x}_i} \sum_{x: x_i > 0} \pi(x) \phi_i(x) \quad (8)$$

## 2.17. EQUIDAD MÁXIMA-MÍNIMA

La noción de equidad máxima-mínima es bien conocida en la ciencia política. Bertsekas y Gallager lo introdujeron como un objetivo de diseño para redes de comunicación. El principio de equidad máxima-mínima es asignar los recursos de la red de tal manera que la tasa de bits de un flujo no se pueda aumentar sin disminuir la tasa de bits de un flujo que tiene una tasa de bits menor [12]. En términos más simples el principio de equidad máximo-mínimo es asignar los recursos de la red de la manera más equitativa posible sin desperdiciar recurso- La equidad máxima-mínima se define de forma única mediante el siguiente procedimiento *water-filling*.

- Se inicia con una tasa de bits igual a cero para todos los flujos
- Se aumenta la tasa de bits de todos los flujos a la misma velocidad hasta que la tasa de bits de algunos flujos sea restringida por la región de capacidad o por su límite de velocidad, se congela la tasa de bits de estos flujos.
- Se aplica el anterior paso repetidamente a los flujos no congelados hasta que se restrinja la tasa de bits de todos los flujos por la región de capacidad o por su límite de velocidad.

La métrica empleada se describe en la siguiente ecuación:

$$m(n, k) = \max\{RT(n, k, t)\} \quad (9)$$



donde  $RT(n, k, t)$  es la razón de transmisión de datos a alcanzar por el equipo móvil del usuario (UE), en el bloque de recursos  $k$  por el usuario  $n$  en el TTI  $t$ , calculada según el esquema de modulación y codificación correspondiente de acuerdo con el indicador de calidad de canal (CQI) reportado. Mientras mayor sea el resultado de la métrica, mayor es la prioridad para asignarle los recursos al UE.

## 2.18. EQUIDAD PROPORCIONAL

La equidad proporcional es un algoritmo de programación basado en compromisos. Tiene en cuenta la información que brinda el canal y a la vez trata de proporcionar una equidad al tener en cuenta el *throughput* pasado del *User Equipment* (UE). La siguiente ecuación se presenta en el algoritmo:

$$EP = MT * BET = \max RT(a, b, c) * \frac{1}{RTP(a, c)} \quad (10)$$

en donde  $RT(a, b, c)$  es la razón de transmisión de datos a alcanzar por el UE en el bloque de recursos  $c$  por el usuario  $a$  en el TTI  $c$ , calculada según el esquema de modulación y codificación correspondiente de acuerdo con el CQI reportado y  $RTP(a, c)$  es el *throughput* pasado del UE a dentro del rango de tiempo  $c$ . EP utiliza el *throughput* pasado del UE como un peso del *throughput* esperado de forma tal que los usuarios que experimentaron un menor *throughput* anteriormente sean servidos en el menor tiempo posible.

La programación equitativa proporcional puede lograrse mediante colas equitativas ponderadas [26]. Este tipo de algoritmo es muy eficiente cuando el tráfico es en tiempo real, ya que se encarga de garantizar una tasa mínima de transmisión. Como todos los algoritmos, lo que busca es maximizar la capacidad de la red, pero como ya se mencionó en párrafos anteriores garantizando una tasa mínima para cada usuario, se enfoca en medidas de la calidad del canal para cada usuario en cada instante de tiempo y asigna recursos al usuario con la mayor relación entre su tasa de transmisión instantánea disponible y su tasa de transmisión real, a lo largo de un intervalo de tiempo definido.

Una característica de este algoritmo es que aplica una cierta “justicia” asigna una prioridad más baja a los usuarios que ya tienen una tasa de transmisión media más alta, así los usuarios puedan transmitir aun cuando tengan peores condiciones de canal.

## 2.19. EQUIDAD EQUILIBRADA

La equidad equilibrada se refiere a las asignaciones más eficientes, fue introducida por Bonald y Proutière como un medio para evaluar aproximadamente el rendimiento de asignaciones “equitativas”, como equidad máxima-mínima y equidad proporcional en redes cableadas [27]. Cuando los flujos comparten el ancho de banda con equidad equilibrada, el rendimiento es en gran medida insensible a las características detalladas del tráfico y puede expresarse en términos relativamente simples.

La equidad equilibrada se define como la asignación única que satisface la propiedad de equilibrio y tal que  $\phi(\mathbf{x})$  pertenece al límite de la capacidad establecida en toso los estados  $\mathbf{x} \neq \mathbf{0}$ . Sea la función de equilibrio correspondiente.

$$\phi_i(\mathbf{x}) = \frac{\phi(\mathbf{x} - \mathbf{e}_i)}{\phi(\mathbf{x})}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (10)$$

La equidad equilibrada puede verse como un objetivo de compartición de ancho de banda que se realizará por mecanismos apropiados de nivel de paquete. Alternativamente, se podría considerar la mera existencia de una asignación insensible como prueba de que las asignaciones más fácilmente realizadas no dependen significativamente de las características del tráfico más allá de la demanda esperada. En otras palabras, el modelo de equidad equilibrada es un buen candidato para aproximarse al comportamiento dinámico de tráfico en la red [28].

## CAPITULO III

### 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

En esta investigación, la evaluación y determinación de la técnica de asignación de recursos más optima en una red de acceso radio 5G se realizará utilizando el software Matlab, que servirá para implementar el modelo de simulación del sistema y realizar los experimentos con el fin de obtener la métrica de rendimiento correspondiente (*throughput* de la red).

##### 3.1.1. INVESTIGACIÓN EXPLORATORIA

El presente estudio consiste en una investigación exploratoria, la cual se realizará mediante la implementación de un modelo de red celular donde se analizarán diferentes parámetros correspondientes a cada técnica de asignación de recursos. La investigación exploratoria corresponde al primer acercamiento a un tema específico antes de abordarlo en un trabajo investigativo más profundo. Se trata de un proceso para tener información básica relacionada con el problema de investigación.

#### 3.2. MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

##### 3.2.1. MÉTODO ANALÍTICO

El método analítico es sumamente útil en campos de estudio novedosos e inexplorados, o en estudios de tipo descriptivo, dado que emplea herramientas que revelan relaciones esenciales y características fundamentales de su objeto de estudio. Además, permite aprender tanto de los aciertos experimentales, como de los errores.

- Analizar el rendimiento, en términos de *throughput*, de cada una de las técnicas de asignación de recursos en el modelo del sistema a través de simulaciones.

##### 3.2.2. MÉTODO DESCRIPTIVO

El objeto de la investigación descriptiva consiste en describir y evaluar ciertas características de una situación particular en uno o más puntos del “tiempo”, en este caso se utiliza este método para describir el comportamiento de parámetros establecidos dentro del modelo de red que vamos a utilizar para la investigación.

### 3.3. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

#### 3.3.1. OBSERVACIÓN

Para esta investigación se utiliza la observación como técnica de tipo estructurada que permite un estudio más preciso de los parámetros que vamos a evaluar y visualizar de forma ordenada.

### 3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

#### 3.4.1. POBLACIÓN

La población está definida por los flujos de tráfico que requieren ser servidos por la estación base. Esta población se somete al modelado del canal de comunicación bajo diferentes condiciones de tráfico para la recolección de datos.

#### 3.4.2. MUESTRA

La muestra consiste en los flujos que han sido servidos satisfactoriamente por la estación base. De aquí se obtiene información de los parámetros necesarios para evaluar el rendimiento (*throughput*) de la red en función del método analítico empleado en la simulación del sistema.

### 3.5. FUENTES DE INFORMACIÓN

Se ha realizado una revisión sistemática de documentos de diferentes bases de datos científicas tales como IEEE, Scielo, Google Scholar, ACM digital library, Elsevier, en donde se puede obtener información de artículos científicos y tesis doctorales relacionados con *network slicing*.

**Tabla 1.** Principales fuentes de información en bases de datos científicas.

Search string	Base de Datos				
	IEEE	Scielo	GOOGLE SCHOLAR	ACM digital library	Elsevier
Network slicing	<a href="https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&amp;arnumber=8329496">https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&amp;arnumber=8329496</a>	<a href="http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S0123-77992018000300027&amp;lang=es">http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S0123-77992018000300027&amp;lang=es</a>	<a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/ipsjip/25/0/25_153/_article-char/ja/">https://www.jstage.jst.go.jp/article/ipsjip/25/0/25_153/_article-char/ja/</a>	<a href="https://dl.acm.org/doi/10.1145/3241539.3267762">https://dl.acm.org/doi/10.1145/3241539.3267762</a>	<a href="https://www.elsevier.com/books/5g-nr/ahmadi/978-0-08-102267-2">https://www.elsevier.com/books/5g-nr/ahmadi/978-0-08-102267-2</a> <a href="https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&amp;arnumber=8329496">https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&amp;arnumber=8329496</a>

Técnicas de asignación de recursos	<a href="https://ieeexplore.ieee.org/document/6991431">https://ieeexplore.ieee.org/document/6991431</a>	<a href="http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S1692-3324201900010165&amp;lang=es">http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S1692-3324201900010165&amp;lang=es</a>	<a href="https://www.dspace.pol.edu.ec/handle/123456789/3184">https://www.dspace.pol.edu.ec/handle/123456789/3184</a>	<a href="https://dl.acm.org/doi/10.1145/1621087.1621099">https://dl.acm.org/doi/10.1145/1621087.1621099</a>	<a href="https://www.elsevier.com/books/cross-layer-resource-allocation-in-wireless-communications/perez-neira/978-0-12-374141-7">https://www.elsevier.com/books/cross-layer-resource-allocation-in-wireless-communications/perez-neira/978-0-12-374141-7</a>
max-min fairness, proportional fairness and balanced fairness	<a href="https://ieeexplore.ieee.org/document/1424745/">https://ieeexplore.ieee.org/document/1424745/</a>	<a href="http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S0121-5167201900020112&amp;lang=es">http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S0121-5167201900020112&amp;lang=es</a>	<a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s11134-006-7587-7">https://link.springer.com/article/10.1007/s11134-006-7587-7</a>	<a href="https://dl.acm.org/doi/10.1145/1140277.1140291">https://dl.acm.org/doi/10.1145/1140277.1140291</a>	<a href="https://www.elsevier.com/books/5g-networks/larsson/978-0-12-812707-0">https://www.elsevier.com/books/5g-networks/larsson/978-0-12-812707-0</a>

*Fuente: Autor*

### 3.6. INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

El principal instrumento en el que vamos a desarrollar esta investigación será el software de Matlab este cuenta con entorno de desarrollo integrado (IDE) que tiene un lenguaje de programación propio (Lenguaje M) y es multiplataforma (Unix, Windows y Apple Mac Os X). Las principales funciones que desarrolla son manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, implementación de algoritmos, creación de interfaces de usuario. Este software permitirá crear un modelo de red para analizar las tres técnicas de asignación de recursos propuestas en esta investigación.

### 3.7. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

*Tabla 2. Operacionalización de las variables*

VARIABLES	CONCEPTO	INDICADORES	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
<b>Independiente:</b> Perfil de transmisión	Un perfil de transmisión corresponde a una asignación específica de recursos radio en la red de comunicación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ancho de banda</li> <li>➤ Potencia de transmisión</li> <li>➤ Flujos de tráfico (carga de la red, clases)</li> </ul>	Observación directa a través de un modelo de simulación de la red celular que consiste en una estación base que atiende un conjunto de flujos de tráfico (Matlab)
<b>Dependiente:</b> <i>Throughput</i>	Es la capacidad de una estación base que sirve un flujo de tráfico determinado por el perfil de transmisión	<i>Throughput</i> del flujo	

*Fuente: Autor*

### 3.8. PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS

Para el desarrollo de este modelado consideraremos una red inalámbrica con un conjunto predeterminado de perfiles de transmisión a ser utilizado en forma secuencial. Cada perfil de transmisión corresponde a una asignación específica de los recursos de radio. Representamos la red de datos como una red de colas de procesador compartido donde cada cola corresponde a una clase de flujo particular.

Denotamos por  $M$  el número de transmisión perfiles y por  $C$  la matriz dimensional  $M \times N$  cuya entrada  $m, i$  da la tasa de bits asignada a los flujos de clase  $i$  en el perfil de transmisión  $m$ . Sea  $T$  el conjunto de  $M$ -dimensional vectores de fila no negativos que suman 1. Cada elemento  $\tau \in T$  define una programación particular en el sentido que el componente  $m$  de  $\tau$  da la fracción de tiempo que se utiliza cada perfil de transmisión.

Se supone que los perfiles de transmisión se programan a una frecuencia suficientemente más alta que la duración típica del flujo, de modo que la capacidad establecida viene dada por:

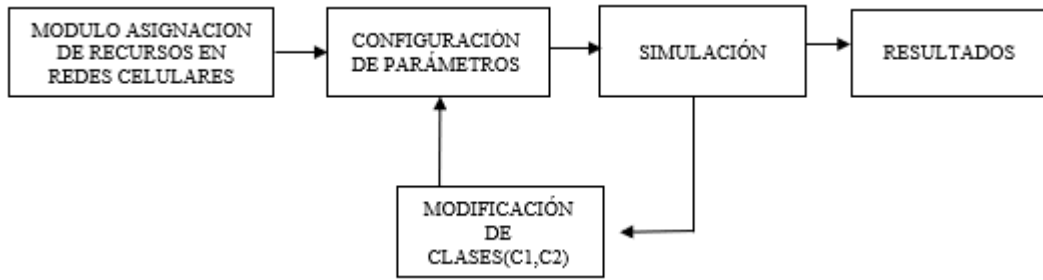
$$C = \{\phi : \exists \tau \in T, \quad \phi \leq \tau C\} \quad (11)$$

#### 3.8.1. MODELO DEL SISTEMA

Se considera el canal de enlace descendente de una sola estación base que sirve un solo flujo a la vez, utilizando un esquema de acceso OFDM. Existen  $N$  perfiles de transmisión, la estación base transmite a un flujo de clase  $i$  en el perfil de transmisión  $i, i=1, \dots, N$ . Por tanto,  $C$  es una matriz diagonal  $N$ -dimensional.

En vista de la propiedad de homotética [12], la equidad proporcional y la equidad equilibrada distribuyen el tiempo de transmisión por igual entre los flujos. El modelo correspondiente es un procesador de cola compartido. La equidad máxima-mínima, por otro lado, no es homotético; ecualiza las tasas de bits de modo que la fracción de tiempo de transmisión asignada a cada flujo de clase  $i$  sea inversamente proporcional a  $C_i$ , el  $i$ -ésimo elemento diagonal de la matriz  $C$ . El correspondiente modelo es un proceso discriminatorio de cola compartido.

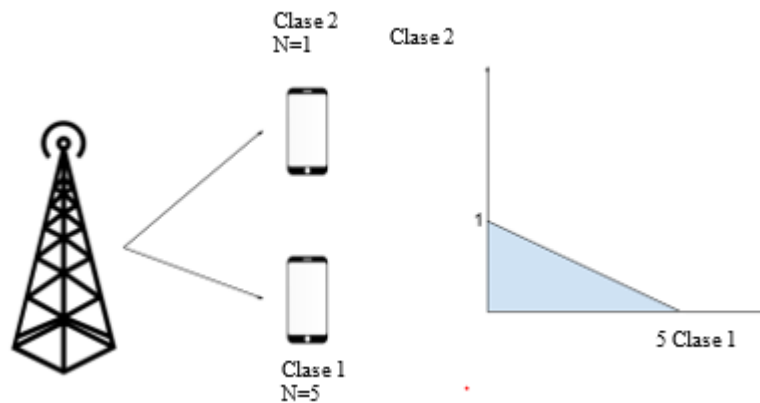
### 3.8.2. PROCEDIMIENTO



*Figura 9. Procedimiento para análisis y obtención de resultados.*

*Fuente: Autor*

1. Realizar una revisión referente a las técnicas de asignación de recursos las redes 5G al igual que las LTE utilizan variados algoritmos de asignación de recursos para distribuir los bloques de recursos de radio disponibles entre los equipos de usuario según la demanda de estos.
2. Para el análisis de estas técnicas consideraremos un simple caso de dos clases, como lo indica en la Figura 6 con diferentes capacidades:  $C1=5$  y  $C2=1$ .



*Figura 10. Descripción de una estación base operando con dos clases (tiempo compartido).*

*Fuente: Autor*

3. El modelo es considerado básicamente donde los móviles experimentan condiciones de radio “buenas” o “malas”. Para equidad equilibrada, los rendimientos del flujo vienen dados por [12]:

$$\gamma_1 = C_1(1 - e) \quad y \quad \gamma_2 = C_2(1 - e) \quad (12)$$

Para equidad proporcional, los rendimientos del flujo vienen dados por [12]:

$$\gamma_1 = (2 - e) \quad y \quad \gamma_2 = \frac{(2 - e)(4 - e)}{8 - e} \quad (13)$$

Donde:

$e = \frac{\rho_1}{c_1} + \frac{\rho_2}{c_2}$  corresponde a la carga de la celda. La condición de estabilidad es  $e < 1$ .

4. Cada perfil de transmisión corresponde a una asignación específica de los recursos de radio. Representamos la red de datos como una red de colas de procesador compartido donde cada cola corresponde a una clase de flujo particular.
5. Para la equidad máximo-mínimo, se obtiene utilizando los resultados de Fayolle [29] en un proceso discriminatorio de cola compartido utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\gamma_1 = C_1 \frac{(1 - e)(2 - e)}{2 - e - e \frac{C_1 C_2 - C_1}{C_2 C_2 + C_1}} \quad (13)$$

$$\gamma_2 = C_2 \frac{(1 - e)(2 - e)}{2 - e - e \frac{C_2 C_1 - C_2}{C_1 C_1 + C_2}} \quad (14)$$



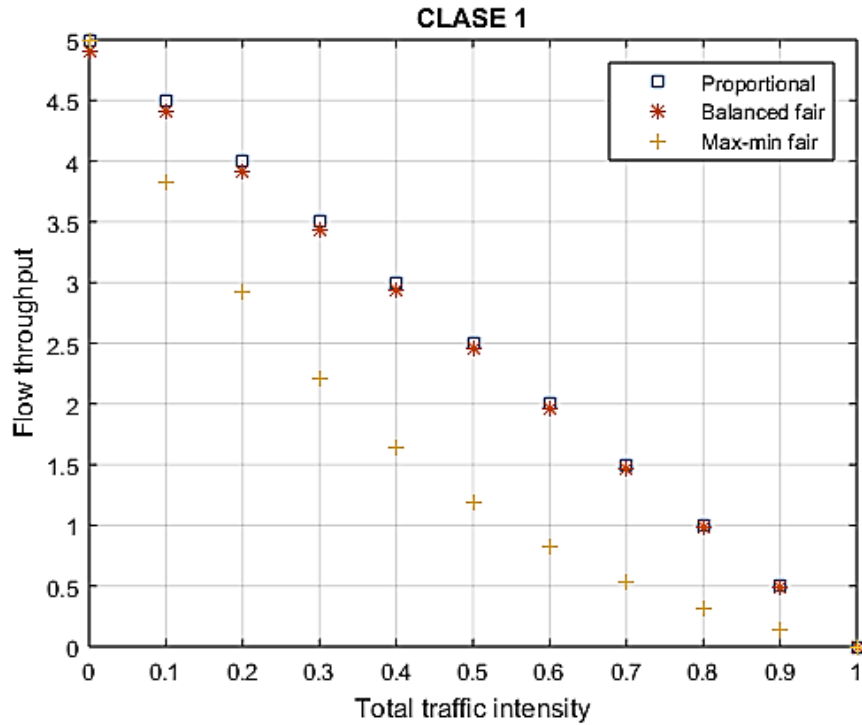
## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos van a estar orientados en torno a las tres técnicas de asignación de recursos antes mencionadas (*Proportional fairness*, *Balanced fairness* y *Max-min fairness*) para determinar el flujo de rendimiento (*Flow throughput*) que hace referencia a la tasa de bits (*bit rate*).

Este flujo de rendimiento se lo representará de forma adimensional en el cual se indicará las veces que el tiempo de transmisión de datos o paquetes es menor; las técnicas de asignación de recursos dependerán del total de la intensidad de tráfico considerada y de los perfiles de transmisión propuestos. Con lo que respecta al total de intensidad de tráfico se definió dos clases, cada clase tendrán distintas intensidades de tráfico y a su vez cada una de estas clases tendrán distintos perfiles de transmisión.

#### **4.1. RESULTADOS PARA LA CLASE 1 CUANDO SE TIENE 5 PERFILES DE TRANSMISIÓN ( $C1 = 5$ ) CONSIDERANDO TODA LA INTENSIDAD DE TRÁFICO.**

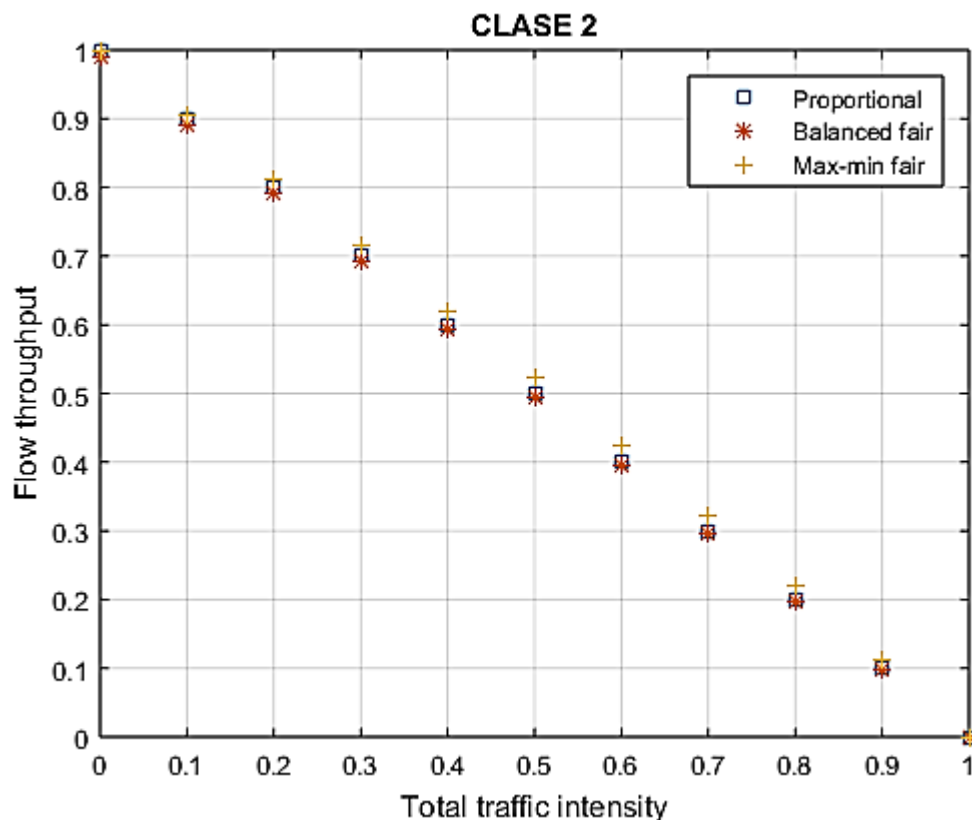


**Figura 11.** Resultados mediante la configuración para clase 1 cuando se implementan 5 perfiles de transmisión.

**Fuente:** (Autor).

En la Figura 11 se puede apreciar que para la técnica *Proportional fairness* y para la técnica *Balanced fairness* al tener una intensidad de tráfico correspondiente a la clase 1 del 70% y cinco perfiles de transmisión, se obtiene un flujo de rendimiento de 1.5, es decir que aumenta 1.5 veces menos el tiempo de transmisión de paquetes o datos lo que es conocido como el *bit rate* en telecomunicaciones. Si comparamos los resultados de las dos técnicas antes mencionadas con la técnica *Max-min fairness* al poseer la misma intensidad de tráfico se obtiene un rendimiento de 1, es decir, que la aumenta una unidad menos el tiempo de transmisión de paquetes o datos. Esto nos indica que para esta clase de intensidad de tráfico las técnicas *Proportional fairness* y *Balanced fairness* presentan mejores resultados. Cabe recalcar que si se emplea el 100 % de la intensidad de tráfico con los que respecta a las técnicas de asignación de recursos el rendimiento es nulo, es decir que el sistema tiende a congestionarse.

#### 4.2. RESULTADOS PARA LA CLASE 2 CUANDO SE TIENE 1 PERFIL DE TRANSMISIÓN ( $C2 = 1$ ) CONSIDERANDO TODA LA INTENSIDAD DE TRÁFICO.

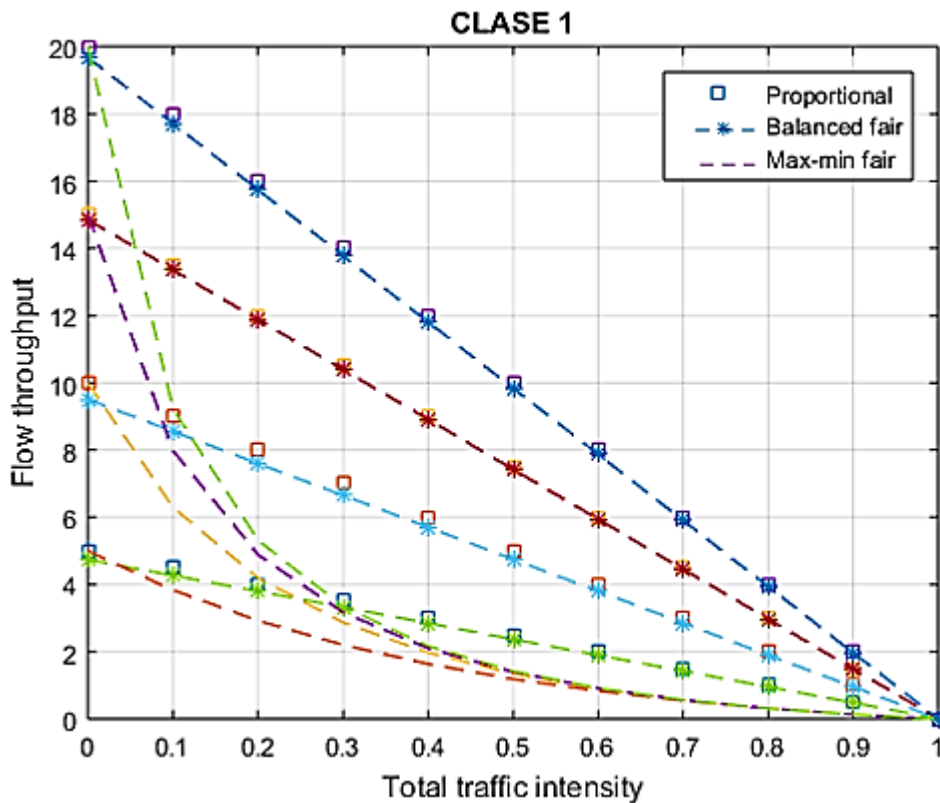


*Figura 12. Resultados para la clase 2 cuando se implementa un perfil de transmisión.*

*Fuente: Autor*

En la Figura 12 se puede apreciar que tanto la técnica *Proportional fairness*, *Balanced fairness* y *Max-min fairness* se obtienen resultados bastantes parecidos cuando se opera con una intensidad de tráfico de clase 2 y solo se emplea un perfil de transmisión, se aprecia también que la ganancia del flujo de rendimiento con lo que respecta a las técnicas *Proportional fairness* y *Balanced fairness* es insignificante al flujo de rendimiento de la técnica *Max-min fairness*. Si comparamos los resultados de la Figura 11 con los resultados de la Figura 12 se nota una ganancia mucho mayor con lo que respecta el flujo de rendimiento que generan la mayor parte de la carga del sistema en la Figura 11 cuando se aumenta los perfiles de transmisión y se emplea una intensidad de tráfico de clase 1.

### 4.3. RESULTADOS OBTENIDOS COMO UNA FUNCIÓN DE LA INTENSIDAD DEL TRÁFICO $\rho_1 = \rho_2$ CUANDO $C1 = \{5, 10, 15, 20\}$ , Y $C2 = 1$ .

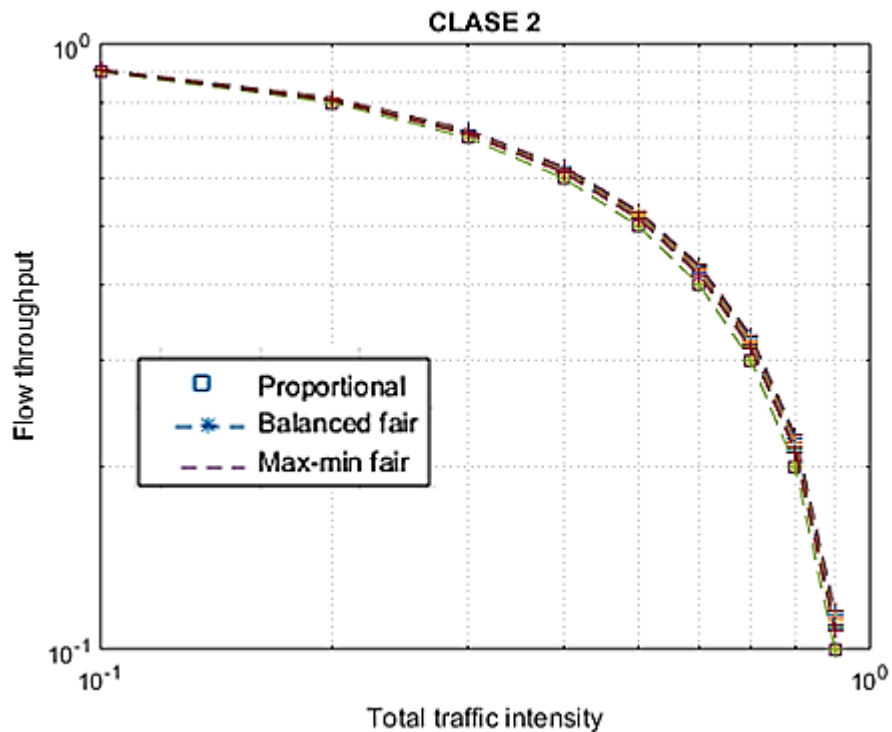


**Figura 13.** Resultados empleando una misma intensidad de tráfico tanto para la Clase 1 como para la Clase 2 y empleando distintos perfiles de transmisión cuya variación va desde el 1 a 20 para la Clase 1.

**Fuente:** Autor

Para este apartado se consideró emplear una misma intensidad de tráfico para ambas clases es decir para la intensidad de tráfico de Clase 1 se la denominara como “ $\rho_1$ ” y la intensidad de tráfico de Clase 2 se la denominara como “ $\rho_2$ ”, respondiendo así a la siguiente función la cual se ha considerado  $\rho_1 = \rho_2$ . En la Figura 13 se puede observar que al implementar distintos perfiles de transmisión para la Clase 1 incrementa considerablemente el flujo de rendimiento con lo que respecta a la velocidad de transmisión de datos, se puede apreciar también que las técnicas de asignación de recursos que muestran mejores resultados son nuevamente las técnicas *Proportional fairness* y *Balanced fairness* en comparación a la técnica *Max-min fairness*. Si consideramos la implementación de 20 perfiles de transmisión para una determinada intensidad de tráfico aplicada y empleando solo el 50% del total de intensidad de tráfico se obtiene una mejora de 10 veces menos tiempo de transmisión de datos para las

técnicas *Proportional fairness* y *Balanced fairness* en comparación con la técnica *Max-min fairness* que al emplear el mismo 50% del total de intensidad de tráfico se obtiene 1.4221219 veces menos tiempo de transmisión de datos, donde las técnicas *Proportional fairness* y *Balanced fairness* presentan una mejora del 85.78%.



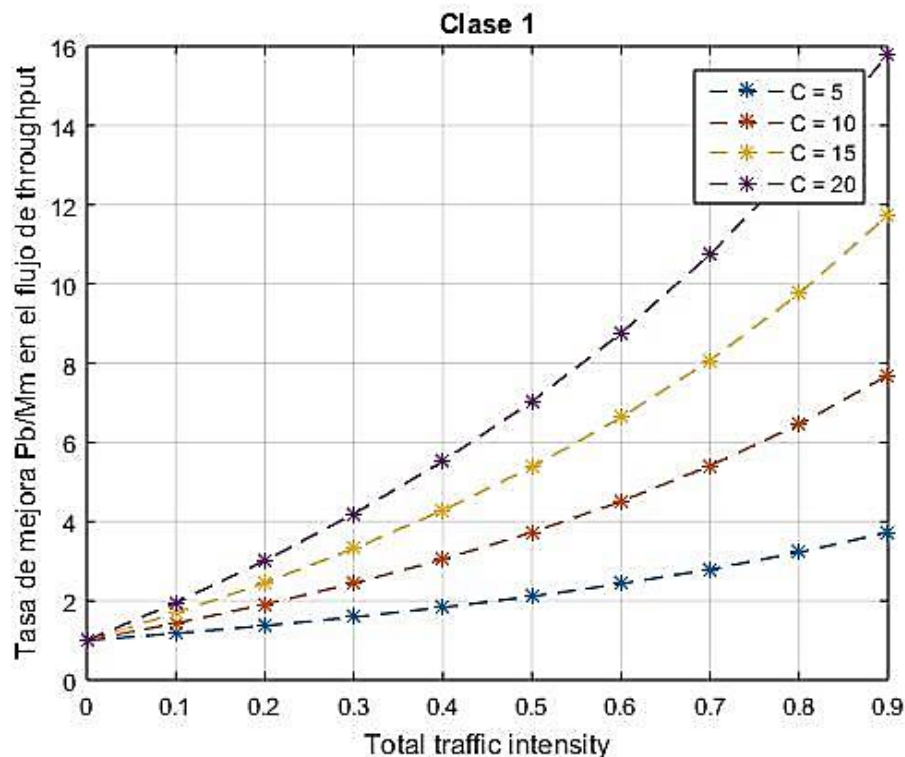
**Figura 14.** Resultados empleando una misma intensidad de tráfico tanto para la clase1 como para la clase 2 y empleando 1 perfil de transmisión para la Clase 2

**Fuente:** Autor

En la Figura 14 se puede observar que a medida que se incrementa la intensidad de tráfico total de la Clase 2 disminuye considerablemente el flujo de rendimiento a pesar de que se ha considerado una misma intensidad de tráfico para ambas Clases, se puede apreciar nuevamente que la ganancia del flujo de rendimiento con lo que respecta a las técnicas *Proportional fairness* y *Balanced fairness* es insignificante al flujo de rendimiento de la técnica *Max-min fairness*, tal y como paso en el apartado anterior, lo que conlleva a que no se aprecia una mejora significativa en el rendimiento. Si comparamos la Figura 13 y la Figura 14 se aprecia que al operar con una misma intensidad de tráfico el flujo de rendimiento mejora en la Clase 1 y esto se debe al aumento del número de perfiles de transmisión aplicados, es decir que cuando se

emplea la Clase1 se reduce el tiempo de transmisión veinte veces menos en comparación con los flujos de perfiles de transmisión de la Clase 2.

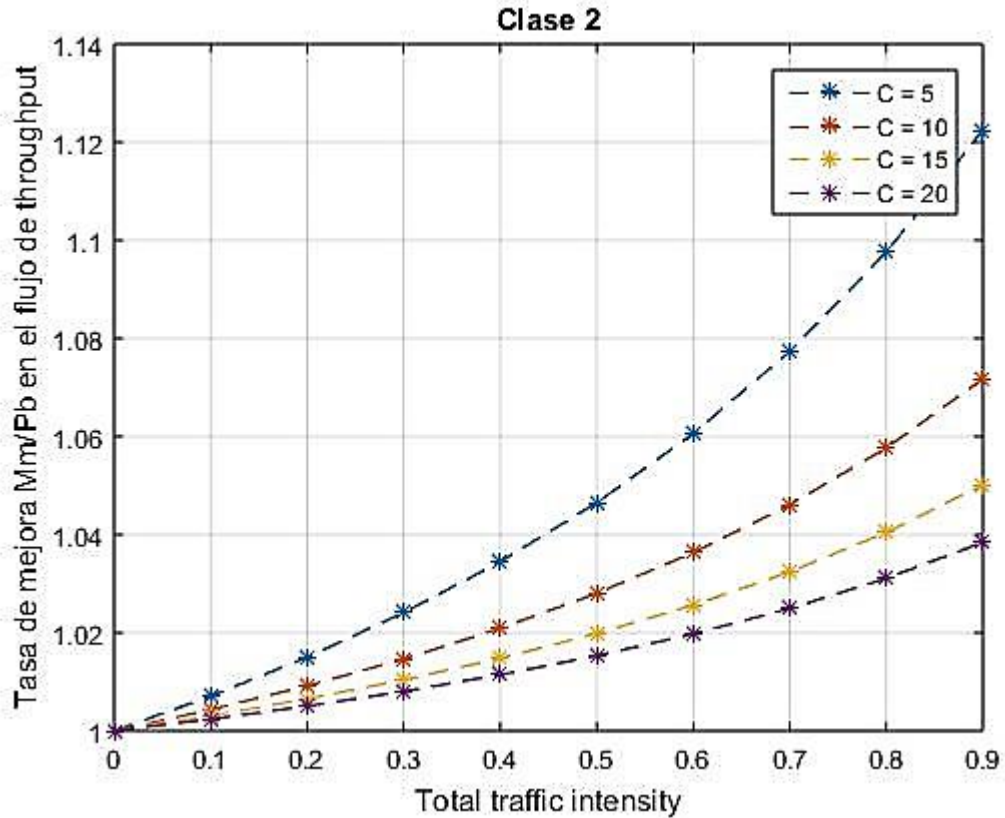
#### 4.4. RELACIÓN DE MEJORA, COMPARACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS.



**Figura 15.** Relación de mejora *Proportional / Balanced fairness* aplicada a la clase 1 en función de distintas intensidades tráfico y distintos perfiles de transmisión.

**Fuente:** Autor

En la Figura 15 se puede observar, por ejemplo, cuando se emplea perfiles de transmisión C=20 para la clase 1 y teniendo una intensidad de tráfico de 90% se alcanza una mejora equivalente a 16 veces en comparativa a emplear un número menor de perfiles de transmisión. En resumen, a medida que se aumenta la intensidad de tráfico y se mantiene el máximo número de perfiles de transmisión, entonces aumenta considerablemente el rendimiento con lo que respecta a utilizar como técnica de asignación de recursos *proporcional/balanced fairness*.



**Figura 16.** Relación de mejora Proportional, Balanced fairness aplicada a la clase 1 en función de distintas intensidades tráfico y distintos perfiles de transmisión.

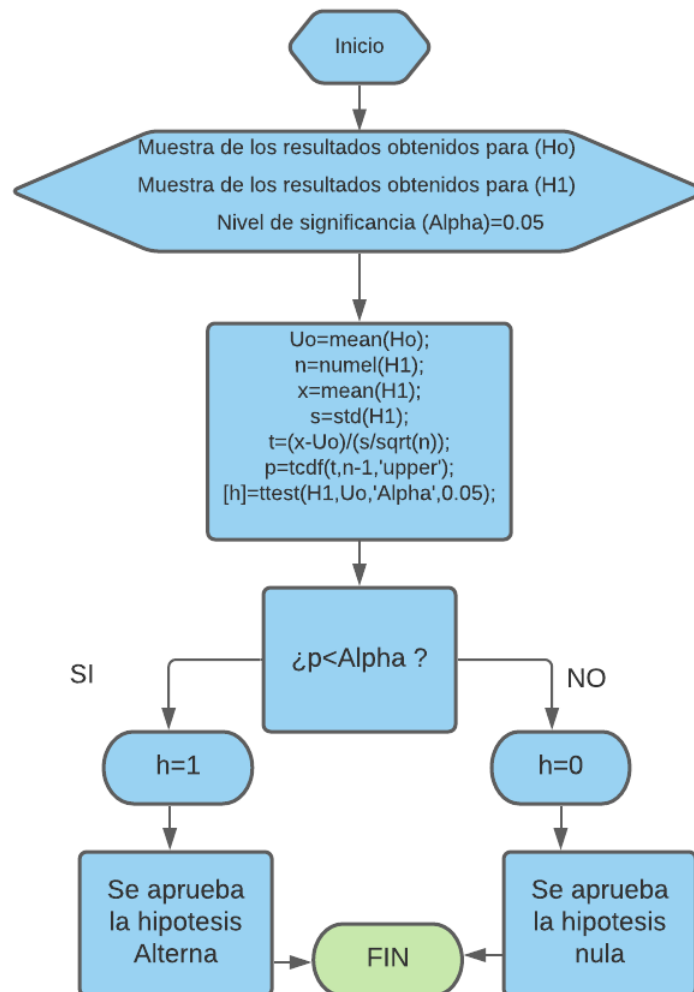
**Fuente:** Autor

En la Figura 16 se puede observar que en comparación con la Figura 15 cuando se emplea un número de perfiles de transmisión  $C=20$  para la clase 2, presenta un índice de rendimiento mucho más bajo, es decir que al emplear la clase 2 con la técnica de asignación de recursos *Max-min fairness* el rendimiento obtenido no es significativo.

#### 4.5. ANÁLISIS INFERENCIAL (PRUEBA DE HIPÓTESIS)

Para este apartado se partirá de una configuración correspondiente a la variación de los perfiles de transmisión (asignaciones de recursos de radio) para la clase 1 denominada “C1” mientras que para la clase 2 denominada “C2” se mantendrá un solo perfil de transmisión. Dicha variación permitirá determinar el flujo de rendimiento (*Flow Throughput*) en las distintas técnicas de asignación de recursos como son Equidad Máxima – Mínima (*Max – min Fairness*), Equidad Proporcional (*Proportional Fairness*) y Equidad Balanceada (*Balanced Fairness*). Se

partirá de tres pruebas de hipótesis donde se comparan las medias basadas en el flujo de rendimiento de las diferentes técnicas de asignación de recursos antes mencionadas.



**Figura 17.-** Diagrama de flujo de procedimientos a realizar para las distintas pruebas de hipótesis

**Fuente:** Autor

Para formular la hipótesis opuesta ( $H_0$ ) partiremos del supuesto que la técnica *Proportional Fairness* posee un mismo flujo de rendimiento que la técnica *Max – min Fairness* o la técnica *Balanced Fairness*, esto irá alternado según corresponda. En cambio, para la formulación de la hipótesis alterna ( $H_1$ ) partiremos del supuesto que la técnica *Proportional Fairness* posee un mayor flujo de rendimiento que la técnica *Max – min Fairness* o que la técnica *Proportional Fairness* posee un mayor flujo de rendimiento que la técnica *Balanced Fairness*. Se trabajará con los valores medios de las dos técnicas de asignación de recursos antes mencionadas que



estarán en función al número de variaciones de los perfiles de transmisión para la clase 1. Para la prueba de hipótesis se consideró un nivel de significancia del 5% es decir un valor de 0.05, se consideró además el estadístico de prueba “*t-student*” descrito en [30] y la toma de decisión se realizó considerando el valor “*p*”. Finalmente se consideró emplear veinte perfiles de transmisión con el fin de determinar las medias de las diferentes técnicas de asignación de recurso que se pueden apreciar en la **Tabla (x)**.

**Tabla 3.** Resultados obtenidos de las medias en función a las diferentes técnicas de asignación de recursos.

	$\mu$ ( <i>Max – min Fair</i> )	$\mu$ ( <i>Proportional Fair</i> )	$\mu$ ( <i>Balanced Fair</i> )
<i>Flow Throughput</i>	1.2493	5.3158	5.1905

Para la prueba de hipótesis se utilizó el software Matlab donde se empleó la función “*ttest*”, la cual nos permite realizar directamente el estadístico de prueba “*t-student*” y además no permite obtener el valor de “*p*”. El valor “*p*” permitirá conocer cuando se acepta o se rechaza la hipótesis nula mediante un parámetro propio que viene incorporado en la función antes mencionada conocido como “*h*”, en otras palabras, cuando  $h = 0$  se acepta la hipótesis nula y cuando  $h = 1$  se rechaza la hipótesis nula.

#### 4.5.1. PLANTEAMIENTO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA LA TÉCNICA PROPORTIONAL FAIR Y MAX – MIN FAIR

- $H_0: \mu(\textit{Proportional Fair}) = \mu(\textit{Max – min Fair})$  el flujo de rendimiento de la técnica de asignación de recursos *Proportional Fairness* es igual al flujo de rendimiento de la técnica de asignación de recursos *Max – min Fairness*.
- $H_1: \mu(\textit{Proportional Fair}) \geq \mu(\textit{Max – min Fair})$  el flujo de rendimiento de la técnica de asignación de recursos *Proportional Fairness* es mayor igual al flujo de rendimiento de la técnica de asignación de recursos *Max – min Fairness*.
- $\alpha = 0.05$  (Nivel de significancia).
- **Estadístico de prueba:** *t-student*.
- **Formulación para regla de la decisión:** una cola a la derecha.

**Tabla 4.** Resultados de los parámetros de la prueba de hipótesis para las técnicas *Proportional Fairness* y *Max – Min Fairness*.

$\mu_0$	1.2493
$\bar{x}$	5.3158
$s$	3.0240
$n$	19
$p$	$7.4913 * 10^{-6}$
$h$	1

**Fuente:** Autor

En la **Tabla 4**, se observa que el nivel de significancia “ $\alpha$ ” es mucho mayor al valor “ $p$ ” por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna ya que el flujo de rendimiento de la técnica de asignación de recursos *Proportional Fairness* es mayor al flujo de rendimiento de la técnica de asignación de recursos *Max – min Fairness*, al 95 % de confianza.

#### 4.5.2. PLANTEAMIENTO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA LA TÉCNICA BALANCED FAIRNESS Y MAX – MIN FAIRNESS

- $H_0: \mu(\text{Balanced Fair}) = \mu(\text{Max – min Fair})$  el flujo de rendimiento de la técnica de asignación de recursos *Balanced Fairness* es igual al flujo de rendimiento de la técnica de asignación de recursos *Max – min Fairness*.
- $H_1: \mu(\text{Balanced Fair}) \geq \mu(\text{Max – min Fair})$  el flujo de rendimiento de la técnica de asignación de recursos *Balanced Fairness* es mayor igual al flujo de rendimiento de la técnica de asignación de recursos *Max – min Fairness*.
- $\alpha = 0.05$  (Nivel de significancia).
- **Estadístico de prueba:** *t-student*.
- **Formulación para regla de la decisión:** una cola a la derecha.

**Tabla 5.** Resultados de los parámetros de la prueba de hipótesis para las técnicas *Balanced Fairness* y *Max – Min Fairness*.

$\mu_0$	1.2493
$\bar{x}$	5.1905
$s$	2.9451
$n$	19
$p$	$4.6377 * 10^{-6}$
$h$	1

**Fuente:** Autor

En la **Tabla 5**, se observa que el nivel de significancia “ $\alpha$ ” es mucho mayor al valor “ $p$ ” por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna ya que el flujo de rendimiento de la técnica de asignación de recursos *Balanced Fairness* es mayor al flujo de rendimiento de la técnica de asignación de recursos *Max – min Fairness*, al 95 % de confianza.

#### 4.5.3. PLANTEAMIENTO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA LA TÉCNICA PROPORTIONAL FAIRNESS Y BALANCED FAIRNESS.

- **$H_0$ :**  $\mu(\textit{Proportional Fair}) = \mu(\textit{Balanced Fair})$  el flujo de rendimiento de la técnica de asignación de recursos *Proportional Fairness* es igual al flujo de rendimiento de la técnica de asignación de recursos *Balanced Fairness*.
- **$H_1$ :**  $\mu(\textit{Proportional Fair}) \geq \mu(\textit{Balanced Fair})$  el flujo de rendimiento de la técnica de asignación de recursos *Proportional Fairness* es mayor igual al flujo de rendimiento de la técnica de asignación de recursos *Balanced Fairness*.
- **$\alpha = 0.05$**  (Nivel de significancia).
- **Estadístico de prueba:** *t-student*.
- **Formulación para regla de la decisión:** una cola a la derecha.

**Tabla 6.** Resultados de los parámetros de la prueba de hipótesis para las técnicas *Proportional Fairness* y *Balanced Fairness*.

<b><math>\mu_0</math></b>	5.1905
<b><math>\bar{x}</math></b>	5.3158
<b><math>s</math></b>	3.0240
<b><math>n</math></b>	19
<b><math>p</math></b>	0.4294
<b><math>h</math></b>	0

**Fuente:** Autor

En la **Tabla 6**, se observa que el nivel de significancia “ $\alpha$ ” es menor al valor de “ $p$ ” por lo que se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna ya que el flujo de rendimiento de la técnica de asignación de recursos *Proportional Fairness* es igual al flujo de rendimiento de la técnica de asignación de recursos *Balanced Fairness*, al 95% de confianza.

#### 4.5.4. DECISIÓN DE RESULTADOS

En la sección anterior se determinó que al variar los perfiles de transmisión de la clase 1 varía el rendimiento en las diferentes técnicas de asignación de recursos, tal es el caso de la técnica *Proportional Fairness* que es mejor en un 2.36% que la técnica *Balanced Fairness*; si comparamos la técnica *Proportional Fairness* con la técnica *Max – min Fairness* se determinó que la técnica *Proportional Fairness* es mejor en un 76.5%.

De igual manera si realizamos otra comparación como la de la técnica *Balanced Fairness* con respecto a la técnica *Max – min Fairness* se determinó que esta es mejor en un 75.93%. Si se analizan las diferentes comparaciones de las técnicas de asignación de recursos podemos deducir que para los sistemas con mayor carga de tráfico la mejor técnica para la asignación de recursos sería *Proportional Fairness* seguida de la técnica *Balanced Fairness* con una ligera variación, casi despreciable, y para los sistemas que no se tenga una carga de tráfico muy densa se podría utilizar la técnica *Max – min Fairness*.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

El estudio de algoritmos de asignación de recursos no se puede abordar sin tener en cuenta la naturaleza aleatoria y dinámica del tráfico. Al modelar el tráfico a nivel de flujo, se ha demostrado que una óptima clase de redes de comunicación puede representarse como una red de colas con tasas de servicio dependientes del estado. El vector de tasas de servicio, que está limitado por un conjunto de capacidad compacto y convexo, determina cómo se asignan los recursos de la red.

Una vez realizada las simulaciones con los distintos escenarios demostramos que la equidad Max-min no satisface la propiedad de equilibrio, excepto en el caso trivial en el que la red se reduce a un conjunto de enlaces independientes. Esto explica por qué existen tan pocos resultados analíticos para esta asignación.

La equidad proporcional y equidad equilibrada es una buena aproximación a cargas elevadas en todos los casos, debido a que la equidad Max-min da una prioridad absoluta a los flujos con velocidades de bits pequeñas, en las redes inalámbricas esto da como resultado una asignación ineficiente donde los flujos que experimentan malas condiciones de radio consumen la mayoría de los recursos de radio.

La equidad proporcional y la equidad equilibrada, por otro lado, son homotéticas, por lo que los recursos de red asignados no dependen de las condiciones de la radio. Estas asignaciones son mucho más eficientes y robustas que la equidad máxima-mínima en tales redes con clases de flujo heterogéneas.

Una vez realizados los experimentos se pudo observar que los algoritmos de asignación enfocados a las distintas clases aumentan el *throughput* total, pero pueden ocasionar negaciones de servicio a los usuarios con bajas condiciones de propagación; mientras que los enfocados en la equidad de la distribución de los recursos brindan valores de *throughput* menores. De este modo, el presente trabajo demuestra la viabilidad de realizar estudios utilizando modelos de simulación para encontrar el mecanismo de asignación más eficiente a utilizar en las redes

5G. Esta es una forma de evaluar el comportamiento de la red con distintas técnicas de asignación de recursos en distintos escenarios que permite comparar su rendimiento final.

## 5.2. RECOMENDACIONES

Los algoritmos de asignación de recursos de radio en las redes 5G tienen la responsabilidad de administrar los bloques de recursos de forma eficiente. Para lograr su objetivo crean métricas que se enfocan en determinadas características del servicio a partir de las cuales priorizan la distribución. La elección del método de asignación de recursos a emplear por la red tiene un gran impacto sobre el *throughput* total del sistema y la calidad del servicio.

Se analizaron tres algoritmos de asignación de recursos y sus posibles implementaciones, pero no se tuvo en cuenta otro factor importante como es la asignación de potencia a los usuarios, lo cual también influye de manera significativa en el desempeño de la red. Para investigaciones futuras se puede realizar un estudio de distintos métodos de asignación de potencia.

Otro aspecto importante en el cual se puede profundizar a futuro es en el modelado del tráfico, es posible estudiar el comportamiento de distintos servicios que usen una red móvil e implementar modelos de tráfico que se acerquen al comportamiento de estos, de esta forma se aproxima aún más a la realidad cantidad de tráfico que circula por la red en la simulación.

Para futuras investigaciones se recomienda implementar un mecanismo de control en la infraestructura de red que integre las diferentes técnicas de asignación de recursos, así de manera automática se podrá determinar que técnica es la más adecuada dependiendo el escenario que se presente, preservando la calidad de servicio y el rendimiento total del sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. D. Ávila Díaz , «Hacia una reflexión histórica de las TIC,» *HALLAZGOS*, pp. pp 213-233, 2013.
- [2] G. M. Fandos, «Formación basada en las Tecnologías,» UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI, Tarragona, 2016.
- [3] V. Jordán, H. Galperin y W. Paredes, «Acelerando la revolucion digital,» Naciones Unidas, Santiago de Chile, 2011.
- [4] T. Bonald y J. Virtamo, «Arecursive formula for multirate systems with elastic traffic,» *IEEE Communications Letters* 9, pp. 753-755, 2005.
- [5] H. D. Y. C. J. H. M. J. & L. V. C. Zhang, «"Fronthauling for 5GLTE-U Ultra Dense Cloud Small Cell Network",» *IEEE Wireless Commun*, vol 23, p. 53, 6 Diciembre 2016.
- [6] A. Osseiran, «"Scenarios for 5G mobile and wireless Communications: The Vision of the METIS Project",» *IEEE Commun Mag*, pp. pp-26-35, 5 Mayo 2014.
- [7] J. Heinonen , «"Mobility Management Enhancements for 5G Low Latency Services ",» *IEEE ICC Wksp*s, pp. pp 68-73, 16 Abril 2016.
- [8] D. Errico, «Structural Health Monitoring and Earthquake Early Warning on 5G URLLC,» *IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pp. pp783-786, 2019.
- [9] P. Rost, «"Mobile Network Architecture Evolution toward 5G",» *IEEE Commun Mag*. vol 54 n° 5, pp. pp 84-91, 4 Mayo 2016.
- [10] M. Jiang, J. Condoluci y L. Mahmodi, «"Network Slicing Management y Prioritizacion in 5G Mobile Systems",» *Euro Wireless 2016*, pp. pp 1-6, 13 junio 2016.
- [11] M. C. Liberatori, «Redes de Datos y sus protocolos,» Editorial de la Universidad Nacional de MAR del Plata, Argentina, 2018.
- [12] T. Bonald, L. Massoulié, A. Proutière y J. Virtamo, «A queueing analysis of max-min fairness, proportional fairness and balanced fairness,» Springer Science+Business Media LLC, Suiza, 2006.
- [13] C. Albert, «Mobile World Live,» 27 Octubre 2015. [En línea]. Available: <https://www.mobileworldlive.com/spanish/skt-y-ericsson-presumen-de-tecnologia-network-slicing-en-la-5g>.
- [14] GSMA, «Posicion de politica publica de la GSMA,» Londres EC4N 8AF, Reino Unido, 2019.
- [15] Samsung, «Network Slicing,» Samsung Electronics, Mexico, 2020.
- [16] I. Ccoyllo Sulca, «Redes definidas por Software (SDN),» TECSUP, MADRID, 2018.
- [17] L. Tello-Oquendo, S.-C. Lin, I. F. Akyildiz y V. Pla, «Software-defined architecture for QoS-aware IoT deployments in 5G systems,» *Ad Hoc Networks*, vol. 93, 2019.
- [18] L. Tello-Oquendo, I. F. Akyildiz, S.-C. Lin y V. Pla, «SDN-based architecture for providing reliable Internet of Things connectivity in 5G systems,» de *17th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)*, 2018.
- [19] D. David, «Evaluación de redes móviles 5G en entornos con aplicaciones IoT,» Editorial de la Universidad de Cataluña, España, 2020.
- [20] J. L. Vicario, «Evaluacion de redes moviles 5G en entornos con aplicaciones IoT,» Universidad de cataluña , España, 2020.



- [21] I. Afolabi, T. Taleb y K. Samdanis, «Network Slicing and Softwarization: A Survey on Principles, Enabling Technologies, and Solutions.,» *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Vols. %1 de %22429-2453, p. 20(3), 2018.
- [22] 5. Americas, «NUEVOS SERVICIOS Y APLICACIONES CON COMUNICACIONES ULTRA CONFIABLES Y DE BAJA LATENCIA 5G,» *BRECHA CERO*, vol. 5, n° 4, p. 20, 2019.
- [23] Sahoo, B.P.S, Chou, C.C y Weng, «Enabling Millimeter-Wave 5G Networks For Massive Iot Applications,» *IEEE*, vol. 10, n° p3-p6, p. 10, 2018.
- [24] Muzante Alexis, Rizzo Martin y Davyt Enzo, «Asignator : Framework para la implementacion de algoritmos de asignacion de recursos en 5G,» Universidad de la Republica de Uruguay, Montevideo, 2021.
- [25] R. J. Boucherie y N. M. Dijk, *Queueing Networks*, New York: Springer, 2011.
- [26] F. Kelly y D. Maulloco, «Rate control for communication networks: Shadow prices, proportional fairness and stability,» *Res. Society*, pp. 237-252, 1998.
- [27] T. Bonald, A. Proutiere, J. Roberts y J. Virtamo, «Computational aspects of balanced fairness,» *Proc. of ITC 18*, pp. 180-190, 2003.
- [28] J. ROBERTS y B. T., «Computational aspects of balanced fairness,» *France Telecom R&D*, p. 40, 2015.
- [29] F. Guy, A. de La Forte, J.-M. Lasgouttes y L. Massoulié, «Best-effort networks: modeling and performance analysis via large networks asymptotics,» *Communications. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society*, Anchorage, AK, USA, 2015.
- [30] R. A. Sánchez Turcios, «t-Student. Usos y abusos,» *Revista mexicana de cardiología*, vol. 26, n° 1, pp. 59 - 61, 2015.
- [31] H. Zhang, N. Liu, X. Chu, K. Long, A.-H. Aghvami y C. Leung, «Network Slicing Based 5G and Future Mobile Networks: Mobility, Resource Management, and Challenges,» Canada, 2017.
- [32] L. Tassiulas y A. Ephremides, «Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multi-hop radio networks,» *IEEE Trans. Aut. Control* 37, pp. 1936-1938, 1992.
- [33] G. Stamatelos y V. Koukoulidis, «Reservation-based bandwidth allocation in a radio ATM network,» *IEEE/ACM Trans. on*, pp. 420-428, 1997.
- [34] T. Marte, «Electronica,» 12 noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.tomasarte.com/2019/04/26/que-es-network-slicing/>.
- [35] M. López Catalá, M. d. C. Guerra Martínez y S. Izaquirre Leach, «Profundización en la Introducción de las Redes Móviles 5G,» *Revista Técnica de Telecomunicaciones de Cuba S.A*, p. 10, 12 junio 2017.
- [36] M. C. R. Jose, «Estudio Y Análisis De Tecnologías Habilitadoras 5G Y sus factibilidades para el desarrollo del intrnet de las cosas,» *Holguin S.A*, Guayaquil, Ecuador, 2018.
- [37] F. Delcoigne, A. Proutière y G. Regnie, «Modeling integration of streaming and data traffic,» *Performance Evaluation* 55(3/4), pp. 185-209, 2004.
- [38] C.I.I, «"New Paradigm of 5G Wireless Internet",» *IEEE ISAC vol 34 n° 3*, pp. 474-82, 4 Marzo 2016.
- [39] VIAVI, «ARQUITECTURA NETWORKSLICING,» *VIAVI Solutions Spain S.A.U*, 2018.

## ANEXOS

### RESULTADOS EN REFERENCIA AL FLOW THROUGHPUT Y TOTAL INTENSIDAD DE TRÁFICO CUANDO SE TIENE C1=5 PERFILES DE TRANSMISIÓN Y C2=1

*Tabla 7.- Tabla de valores de Porporcional fairness (g1pf), Balanced fairness(g1Bf) y Max-min fairness(g1Mm) en referencia a Flow throughput y total traffic intensity(e), cuando se tiene una clase con 5 perfiles de transmisión.*

e	0	0,06	0,12	0,18	0,24	0,3	0,36	0,42	0,48	0,54	0,6
g1Pf	5	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0
g1Bf	5	4,473	3,976	3,479	2,98	2,48	1,988	1,491	0,994	0,497	0
g1Mm	5	3,82	2,91	2,20	1,63	1,18	0,82	0,536	0,310	0,13	0

*Tabla 8.-Tabla de valores de Porporcional fairness/Balanced fairness(g1p) y Max-min fairness(g1Mm) en referencia a Flow throughput y total traffic intensity(e), cuando se tiene una clase con 1 perfiles de transmisión.*

e	0	0,06	0,12	0,18	0,24	0,3	0,36	0,42	0,48	0,54	0,6
g1Pf	1	0,94	0,88	0,82	0,76	0,7	0,64	0,58	0,52	0,46	0,4
g1Bf	0,98	0,882	0,784	0,686	0,588	0,490	0,392	0,294	0,196	0,098	0
g2mm	1	0,90	0,81	0,716	0,62	0,52	0,42	0,32	0,219	0,11	0

### RESULTADOS EN REFERENCIA AL FLOW THROUGHPUT Y TOTAL INTENSIDAD DE TRÁFICO CUANDO SE TIENE C1=10 PERFILES DE TRANSMISIÓN Y C2=1

*Tabla 9.-Tabla de valores de Porporcional fairness en referencia a Flow throughput y total traffic intensity(e), cuando se tiene la clase 1 con 10 perfiles de transmisión*

e	0	0,09	0,18	0,27	0,36	0,45	0,54	0,63	0,72	0,81	0,9	0,99
g10Pf	10	9,1	8,2	7,3	6,4	5,5	4,6	3,7	2,8	1,9	1	0,1
g9 Pf	9	8,19	7,38	6,57	5,76	4,95	4,14	3,33	2,52	1,71	0,9	0,09
g8 Pf	8	7,28	6,56	5,84	5,12	4,4	3,68	2,96	2,24	1,52	0,8	0,08
g7 Pf	7	6,37	5,74	5,11	4,48	3,85	3,22	2,59	1,96	1,33	0,7	0,07
g6 Pf	6	5,46	4,92	4,38	3,84	3,3	2,76	2,22	1,68	1,14	0,6	0,06
g5 Pf	5	4,55	4,1	3,65	3,2	2,75	2,3	1,85	1,4	0,95	0,5	0,05
g4 Pf	4	3,64	3,28	2,92	2,56	2,2	1,84	1,48	1,12	0,76	0,4	0,04
g3 Pf	3	2,73	2,46	2,19	1,92	1,65	1,38	1,11	0,84	0,57	0,3	0,03
g2 Pf	2	1,82	1,64	1,46	1,28	1,1	0,92	0,74	0,56	0,38	0,2	0,02
g1 Pf	1	0,91	0,82	0,73	0,64	0,55	0,46	0,37	0,28	0,19	0,1	0,01

**Tabla 10.-**Tabla de valores de Proportional fairness en referencia a Flow throughput y total traffic intensity(e), cuando se tiene la clase 1 con 10 perfiles de transmisión

e	0	0,09	0,18	0,27	0,36	0,45	0,54	0,63	0,72	0,81	0,9	0,99
g10 Bf	10	8,99	8,24	7,25	6,35	5,25	4,55	3,65	2,85	1,89	1	0,1
g9 Bf	9	8,15	7,35	6,57	5,76	4,95	4,14	3,33	2,52	1,71	0,9	0,09
g8 Bf	8	7,22	6,53	5,84	5,12	4,4	3,68	2,96	2,24	1,52	0,83	0,082
g7 Bf	7	6,28	5,65	5,11	4,48	3,85	3,22	2,59	1,96	1,33	0,	0,071
g6 Bf	6	5,15	4,85	4,38	3,84	3,3	2,76	2,22	1,68	1,14	0,6	0,061
g5 Bf	5	4,35	3,9	3,65	3,2	2,75	2,3	1,85	1,4	0,95	0,5	0,045
g4 Bf	4	3,55	3,6	2,92	2,56	2,2	1,84	1,48	1,12	0,76	0,4	0,03
g3 Bf	3	2,62	2,35	2,19	1,92	1,65	1,38	1,11	0,84	0,57	0,3	0,02
g2 Bf	2	1,75	1,35	1,46	1,28	1,1	0,92	0,74	0,56	0,38	0,2	0,01
g1 Bf	1	0,89	0,7	0,65	0,61	0,53	0,43	0,32	0,25	0,17	0,09	0,013

**Tabla 11.-**Tabla de valores de Max-min fairness (g1Mm) en referencia a Flow throughput y total traffic intensity(e), cuando se tiene la clase 1 con 10 perfiles de transmisión

e	0	0,09	0,18	0,27	0,36	0,45	0,54	0,63	0,720	0,810	0,900	0,9900
g10Mm	10	6,57	4,532	3,21	2,289	1,63	1,143	0,7769124	0,500	0,289	0,130	0,0111
g9Mm	9	6,12	4,311	3,09	2,232	1,6	1,13	0,7724517	0,499	0,290	0,131	0,0112
g8Mm	8	5,63	4,061	2,96	2,164	1,57	1,115	0,7665784	0,498	0,290	0,131	0,0113
g7Mm	7	5,11	3,778	2,81	2,081	1,53	1,095	0,758589	0,496	0,291	0,132	0,0114
g6Mm	6	4,54	3,455	2,62	1,979	1,47	1,068	0,7472727	0,493	0,291	0,133	0,0115
g5Mm	5	3,93	3,083	2,4	1,848	1,4	1,03	0,7304035	0,487	0,291	0,134	0,0117
g4Mm	4	3,27	2,651	2,12	1,677	1,3	0,975	0,7035392	0,477	0,289	0,135	0,0119
g3Mm	3	2,55	2,142	1,77	1,444	1,15	0,888	0,6568898	0,456	0,282	0,135	0,0121
g2Mm	2	1,76	1,539	1,32	1,117	0,92	0,738	0,5663687	0,407	0,261	0,129	0,0121
g1Mm	1	0,91	0,82	0,73	0,64	0,55	0,46	0,37	0,280	0,190	0,100	0,0100

**RESULTADOS OBTENIDOS EN REFERENCIA AL FLOW THROUGHPUT Y TOTAL INTENSIDAD DE TRÁFICO CUANDO SE TIENE C1=1 PERFILES DE TRANSMISIÓN Y C2=10**

**Tabla 12.-**Tabla de valores de Porportional fairness/Balanced fairness(g1p) en referencia a Flow throughput y total traffic intensity(e), cuando se tiene la clase 2 con 10 perfiles de transmisión

e	0	0,09	0,18	0,27	0,36	0,45	0,54	0,63	0,72	0,81	0,9	0,99
g10Pb2	10	9,1	8,2	7,3	6,4	5,5	4,6	3,7	2,8	1,9	1	0,1
g9Pb2	9	8,19	7,38	6,57	5,76	4,95	4,14	3,33	2,52	1,71	0,9	0,09
g8Pb2	8	7,28	6,56	5,84	5,12	4,4	3,68	2,96	2,24	1,52	0,8	0,08

g7Pb2	7	6,37	5,74	5,11	4,48	3,85	3,22	2,59	1,96	1,33	0,7	0,07
g6Pb2	6	5,46	4,92	4,38	3,84	3,3	2,76	2,22	1,68	1,14	0,6	0,06
g5Pb2	5	4,55	4,1	3,65	3,2	2,75	2,3	1,85	1,4	0,95	0,5	0,05
g4Pb2	4	3,64	3,28	2,92	2,56	2,2	1,84	1,48	1,12	0,76	0,4	0,04
g3Pb2	3	2,73	2,46	2,19	1,92	1,65	1,38	1,11	0,84	0,57	0,3	0,03
g2Pb2	2	1,82	1,64	1,46	1,28	1,1	0,92	0,74	0,56	0,38	0,2	0,02
g1Pb2	1	0,91	0,82	0,73	0,64	0,55	0,46	0,37	0,28	0,19	0,1	0,01

**Tabla 13.-** Tabla de valores obtenidos de Max-min fairness (g1Mm) en referencia a Flow throughput y total traffic intensity(e), cuando se tiene la clase 2 con 10 perfiles de transmisión

e	0	0,09	0,18	0,27	0,36	0,45	0,54	0,63	0,720	0,810	0,900	0,9900
g10Mm2	10	6,57	4,532	3,21	2,289	1,63	1,143	0,7769124	0,500	0,289	0,130	0,0111
g9Mm2	9	6,12	4,311	3,09	2,232	1,6	1,13	0,7724517	0,499	0,290	0,131	0,0112
g8Mm2	8	5,63	4,061	2,96	2,164	1,57	1,115	0,7665784	0,498	0,290	0,131	0,0113
g7Mm2	7	5,11	3,778	2,81	2,081	1,53	1,095	0,758589	0,496	0,291	0,132	0,0114
g6Mm2	6	4,54	3,455	2,62	1,979	1,47	1,068	0,7472727	0,493	0,291	0,133	0,0115
g5Mm2	5	3,93	3,083	2,4	1,848	1,4	1,03	0,7304035	0,487	0,291	0,134	0,0117
g4Mm2	4	3,27	2,651	2,12	1,677	1,3	0,975	0,7035392	0,477	0,289	0,135	0,0119
g3Mm2	3	2,55	2,142	1,77	1,444	1,15	0,888	0,6568898	0,456	0,282	0,135	0,0121
g2Mm2	2	1,76	1,539	1,32	1,117	0,92	0,738	0,5663687	0,407	0,261	0,129	0,0121
g1Mm2	1	0,91	0,82	0,73	0,64	0,55	0,46	0,37	0,280	0,190	0,100	0,0100

**RESULTADOS EN REFERENCIA AL FLOW THROUGHPUT Y TOTAL INTENSIDAD DE TRÁFICO CUANDO SE TIENE C1 = {5..10..15..20} PERFILES DE TRANSMISIÓN Y C2=1**

**Tabla 14.-** Tabla de valores obtenidos de Proportional fairness/Balanced fairness(g1p) en referencia a Flow throughput y total traffic intensity(e), cuando se tiene la clase 1 con 5,10,15,20 perfiles de transmisión

VALORES DE FLUJO DE RENDIMIENTO DE CADA CLASE			
5	10	15	20
4,5	9	13,5	18
4	8	12	16
3,5	7	10,5	14
3	6	9	12
2,5	5	7,5	10
2	4	6	8
1,5	3	4,5	6

1	2	3	4
0,5	1	1,5	2

**Tabla 15.-** Tabla de valores de Max-min fairness( $gIMm$ ) en referencia a Flow throughput y total traffic intensity( $e$ ), cuando se tiene la clase 1 con 5,10,15,20 perfiles de transmisión

VALORES DE FLUJO DE RENDIMIENTO DE CADA CLASE			
5,000	10,000	15,000	20,000
3,828	6,291	7,984	9,220
2,919	4,190	4,881	5,315
2,204	2,864	3,166	3,339
1,636	1,970	2,102	2,172
1,184	1,341	1,395	1,422
0,824	0,888	0,906	0,914
0,537	0,555	0,558	0,558
0,310	0,310	0,308	0,306
0,134	0,130	0,128	0,127