



---

---

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”  
ZACATENCO

**“EVALUACIÓN DE LA SUMA DE TASAS CON ESQUEMAS  
DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS EN NOMA “**

**TESIS**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA**

PRESENTAN:

MARTINEZ SANCHEZ ALEJANDRA ABIGAIL

MEJIA BENITEZ HUGO EMMANUEL

PORRAS LOPEZ ARES YUKIOUS

ASESORES:

M. EN C. LUIS ALBERTO VÁSQUEZ TOLEDO

ING. JULIO CÉSAR NIEVES GODÍNEZ



CIUDAD DE MÉXICO, AGOSTO 2019

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”**

**TEMA DE TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA  
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL  
DEBERA (N) DESARROLLAR C. ALEJANDRA ABIGAIL MARTINEZ SANCHEZ  
C. HUGO EMMANUEL MEJIA BENITEZ  
C. ARES YUKIOUS PORRAS LOPEZ

**“EVALUACIÓN DE LA SUMA DE TASAS CON ESQUEMAS DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS EN NOMA”**

DESARROLLAR UNA METODOLOGÍA DE ASIGNACIÓN DE USUARIOS QUE MAXIMICE LA SUMA DE TASAS EN SISTEMAS CELULARES BASADOS EN NOMA.

- ❖ EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS CELULARES
- ❖ ONDAS MILIMÉTRICAS EN LOS SISTEMAS CELULARES 5G
- ❖ PARÁMETROS DE OPERACIÓN EN SISTEMAS CELULARES 5G
- ❖ SUMA DE TASAS DE TRANSFERENCIA DE DATOS EN NOMA

CIUDAD DE MÉXICO, A 12 DE AGOSTO DEL 2019.

**ASESORES**

M. EN C. LUIS ALBERTO VÁSQUEZ TOLEDO  M. EN C. RABINDRANATH RESENDIZ VÁZQUEZ  ING. JULIO CÉSAR NIEVES GODÍNEZ

  
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA  
M. EN C. RABINDRANATH RESENDIZ VÁZQUEZ  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

## Autorización de uso de obra

**Instituto Politécnico Nacional**

**P r e s e n t e**

Bajo protesta de decir la verdad los que suscriben **Alejandra Abigail Martínez Sánchez, Hugo Emmanuel Mejía Benítez y Ares Yukious Porras López**, manifestamos ser autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada “**EVALUACIÓN DE LA SUMA DE TASAS CON ESQUEMAS DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS EN NOMA**”, en adelante “**La Tesis**” y de la cual se adjunta copia en *un impreso y un CD*, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgamos al **Instituto Politécnico Nacional**, en adelante **El IPN**, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales o en cualquier otro medio; para apoyar futuros trabajos relacionados con el tema de “**La Tesis**” por un periodo de **3 años** contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente de no dar aviso expreso a **El IPN** de su terminación.

En virtud de lo anterior, **El IPN** deberá reconocer en todo momento nuestra calidad de autores de “**La Tesis**”.

Adicionalmente, y en nuestra calidad de autores y titulares de los derechos morales y patrimoniales de “**La Tesis**”, manifestamos que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por los suscritos respecto de “**La Tesis**”, por lo que deslindamos de toda responsabilidad a **El IPN** en caso de que el contenido de “**La Tesis**” o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumimos las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México, a 01 de octubre de 2019.

**Atentamente**

---

**Alejandra Abigail Martínez  
Sánchez**

---

**Hugo Emmanuel Mejía  
Benítez**

---

**Ares Yukious Porras López**

## **Agradecimientos**

Mi más profundo agradecimiento a mis amigos Hugo y Ares, que han colaborado en la realización del presente trabajo y en especial a mi asesor el Dr. Luis Alberto Vásquez Toledo, por la orientación, el seguimiento y la supervisión del mismo.

Gracias a mis padres por darme todo su apoyo, amor, motivación y el esfuerzo que han hecho para que termine mi carrera, a mis hermanos, por apoyarme y quererme siempre.

Mi más sincero agradecimiento al Instituto Politécnico Nacional y a la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, por darme tanto.

**Martínez Sánchez Alejandra Abigail**

Mi más grande agradecimiento a mis padres, los cuales me apoyaron siempre tanto moral como monetariamente, que a pesar de los grandes gastos que tuvieron que hacer por mí al estudiar en un estado diferente, siempre estuvieron conmigo.

A mi compañera Abigail, que me ha acompañado toda la carrera, y mi compañero Ares, con los cuales no podría y a nuestro asesor el Dr. Luis Alberto Vásquez Toledo, los cuales hicieron posible la elaboración de este documento.

Mi más sincero agradecimiento a mi alma mater el Instituto Politécnico Nacional la cual me dio la oportunidad de culminar mi carrera.

**Mejia Benitez Hugo Emmanuel**

Agradezco profundamente a mis padres, quienes me han brindado todo su apoyo a lo largo de toda mi vida y carrera estudiantil, con quienes en esta etapa tan importante me dieron lo más que pudieron para lograr que hoy me encuentre en el lugar que estoy.

Agradezco a mis amigos Abigail y Hugo con los que tuve la fortuna de realizar este trabajo y que fueron grandes compañeros a lo largo de los semestres que compartimos. A mi asesor Dr. Luis Alberto Vásquez Toledo le doy las gracias por el apoyo que nos brindó en la realización de nuestro trabajo y por permitirnos trabajar con él.

Por último, mi más sincero agradecimiento al Instituto Politécnico Nacional que más que ser la Institución que me forjo como estudiante en el Nivel Medio Superior y Nivel Superior fue una segunda casa para mí, y de la cual tendré siempre presente en mi memoria.

**Porras López Ares Yukiouis**

# Contenido

Lista de acrónimos .....	iii
Índice de figuras.....	v
Índice de tablas.....	vi
Objetivo general.....	vii
Objetivos específicos .....	vii
CAPÍTULO 1 Evolución de los Sistemas Celulares .....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Técnicas de acceso múltiple.....	2
1.2.1 FDMA.....	3
1.2.2 TDMA .....	5
1.2.3 CDMA .....	6
1.2.4 OFDMA.....	8
1.3 Sistemas celulares basados en conmutación de circuitos .....	9
1.3.1 Primera generación: Sistemas Analógicos .....	9
1.3.2 Segunda generación: Sistemas digitales y el caso de GSM.....	11
1.3.3 Tercera generación .....	13
1.4 Sistemas celulares basados en conmutación de paquetes.....	15
1.4.1 Cuarta generación.....	16
1.5 Propuestas para 5G.....	18
CAPÍTULO 2 Ondas Milimétricas en los Sistemas Celulares 5G .....	23
2.1 Espectro de operación .....	23
2.2 Modelos de propagación .....	23
2.2.1 Rec. UIT-R P.1411-8.....	25
2.2.2 Rec. UIT-R P.1238-8.....	28
2.3 Modelos de Propagación en LTE.....	31
2.3.1 Modelo COST 231 Hata .....	32
2.3.2 Modelo Ericsson 9999.....	35
2.3.3 Modelo SUI.....	36
2.4 Modelos de Propagación para 5G.....	39
2.4.1 Modelo Floating Intercept .....	39
2.4.2 Modelo Close-in free space reference.....	41

2.4.3 Modelo Alpha-Beta-Gamma .....	43
2.4.4 Modelo Close-in free space reference frequency dependant .....	44
2.5 Modelos de Propagación 5G a frecuencia mínima de operación 30 GHz.....	47
2.6 Modelos de Propagación 5G a frecuencia máxima de operación 72 GHz .....	48
2.7 Comparación de los Modelos de Propagación en LTE y 5G.....	49
2.8 Modelos LTE VS ondas milimétricas, una alternativa para 5G .....	50
CAPÍTULO 3 Parámetros de operación en sistemas celulares 5G.....	52
3.1 Relación Señal a Ruido más Interferencia SINR .....	52
3.1.1 SIR con OFDMA .....	57
3.1.2 SIR con NOMA.....	59
3.1.3 Tasa de transferencia de datos .....	62
CAPITULO 4 Suma de tasas de transferencia de datos en NOMA .....	67
4.1 Esquema 1 de asignación de usuarios. ....	67
4.2 Esquema 2 de asignación de usuarios .....	68
4.3 Esquema 3 de asignación de usuarios .....	70
4.4 Combinación de NOMA y Ondas Milimétricas.....	72
4.4.1 Tasa de Transferencia .....	73
4.4.2 Suma de Tasa de Transferencia .....	73
Conclusiones .....	74
Trabajos a Futuro .....	75
Referencias.....	76

## Lista de acrónimos

<b>FDMA</b>	(Frequency Division Multiple Access)
<b>TDMA</b>	(Time Divison Multiple Access)
<b>CDMA</b>	(Code Division Multiple Access)
<b>OFDMA</b>	(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
<b>AMPS</b>	(Advance Mobile Phone System)
<b>FDD</b>	(Frequency Division Duplexing)
<b>TDD</b>	(Time Division Duplexing)
<b>FM</b>	(Frequency Modulation)
<b>DL</b>	(Download)
<b>UL</b>	(Upload)
<b>GSM</b>	(Global System Mobile)
<b>IS-95</b>	(Interim Standard 95)
<b>D-AMPS</b>	(Digital Advance Mobile Phone System)
<b>BS</b>	(Base Station)
<b>UE User</b>	(Equipment)
<b>GPRS</b>	(General Packet Radio Service)
<b>E-GPRS</b>	(Enhanced GPRS)
<b>EDGE</b>	(Enhanced Data Rates for GSM Evolutions)
<b>UMTS</b>	(Universal Mobile Telecommunications System)
<b>WAP</b>	(Wireless Application Protocol)
<b>HSPA</b>	(High- Speed Packet Access)
<b>UDP</b>	(User Datagram Protocol)
<b>TCP</b>	(Transmission Control Protocol)
<b>LTE</b>	(Long Term Evolution)
<b>3GPP</b>	(Third Generation Partnership Project)
<b>mmWave</b>	(Ondas Milimétricas)
<b>MIMO</b>	(Multiple Inputs Multiple Outputs)

<b>NOMA</b>	(Non-Orthogonal Multiple Access)
<b>D2D</b>	(Device to Device)
<b>M2M</b>	(Machine to Machine)
<b>UHF</b>	(Ultra High Frequency)
<b>SHF</b>	(Super High Frequency)
<b>EHF</b>	(Extremely High Frequency)
<b>LoS</b>	(Line of Sight)
<b>NLoS</b>	(Non-Line of Sight)
<b>SINR</b>	(Signal to Interference plus Noise Relation)
<b>SIR</b>	(Signal to Interference Relation)
<b>BW</b>	(Bandwidth)

## Índice de figuras

Figura 1.1 FDMA, cada usuario transmite sin limitaciones en tiempo, pero usando solo una porción del ancho de banda disponible. ....	3
Figura 1.2 Banda de guarda, se divide el ancho de banda total en subportadoras y entre cada una de ellas existe un intervalo de guarda. ....	4
Figura 1.3 TDMA, cada usuario transmite usando todo el ancho de banda disponible, pero solo por un intervalo de tiempo definido. ....	5
Figura 1.4 CDMA, cada usuario transmite usando todo el ancho de banda, por todo el tiempo disponible, diferenciándose por un código asignado a cada usuario ....	6
Figura 1.5 Ejemplo señales ortogonales en sistemas OFDMA. ....	8
Figura 1.6 Aumento en la tasa de transmisión de datos móviles ....	19
Figura 1.7 Espectro Electromagnético ....	20
Figura 2.1 Clasificación de los modelos de propagación.....	25
Figura 2.2 Entornos de funcionamiento físico ....	26
Figura 2.3 Pérdidas (dBs) de camino en el modelo general para interiores.....	30
Figura 2.4 Pérdidas de Trayecto en Modelo COST Hata, en donde observamos las pérdidas de trayecto a una frecuencia de 1500MHz y 2000MHz a lo largo de una distancia de 10 Km.....	34
Figura 2.5 Pérdidas de Trayecto en Modelo Ericsson 9999, en donde se observan las pérdidas de trayecto a las frecuencias de 1500 MHz y 2000Mhz a lo largo de una distancia de 10Km.....	36
Figura 2.6 Pérdidas de Trayecto en Modelo SUI, en donde se observan las pérdidas de trayecto en sus 3 distintas categorías a lo largo de una distancia de 10000 metros.....	39
Figura 2.7 Pérdidas de Camino en Floating Intercept con una frecuencia de 28 y 73 GHz a lo largo de una distancia de 140 metros.....	40
Figura 2.8 Pérdidas de Camino en Close in Free en donde se observan las pérdidas de trayectoria en las frecuencias 30 y 72 GHz a lo largo de 140 metros. ....	42
Figura 2.9 Pérdidas de Camino en Alpha-Beta-Gamma a una frecuencia de 30 y 72 GHz a lo largo de una distancia de 120 metros.....	44
Figura 2.10 Pérdidas de Camino en Close-in Free Frequency Dependendant ....	45
Figura 2.11 Comparación de los distintos Modelos de Propagación a una frecuencia de 30GHz a lo largo de una distancia de 120 metros. ....	47
Figura 2.12 Comparación de los distintos Modelos de Propagación en frecuencia de 72GHz a lo largo de una distancia de 120 metros. ....	48
Figura 2.13 Pérdidas de Trayecto en los Modelos de LTE y Ondas Milimétricas ....	51
Figura 3.1 Entorno de simulación 19 celdas ....	53
Figura 3.2 Ganancia de la Antena.....	55
Figura 3.3 Gráfica SINR vs Distancia a los usuarios.....	57
Figura 3. 4 Escenario de simulacion, 20 usuarios por celda. ....	58
Figura 3. 5 Relación señal a Ruido del escenario de la Fig. 3.3, con OFDMA, con respecto a la distancia a la que se encuentran los usuarios de estacion base. ....	58
Figura 3.6 Escenario de simulación propuesto para NOMA con 2 usuarios por subportadora, con un ancho de banda de 15Mhz y un total de 40 usuarios por celda. ....	60
Figura 3.7 Gráfica de SINR vs Distancia para NOMA con 2 usuarios por subportadora, con un total de 20 subportadoras. ....	60

Figura 3. 8 Entorno de simulación para NOMA con 3 usuarios por subportadora, con un total de 60 usuarios por celda. ....	61
Figura 3. 9 Gráfica de SIR vs Distancia para NOMA con 3 usuarios.....	62
Figura 3.10 Comparación entre OFDMA y NOMA. ....	63
Figura 3.11 Tasa de Transmisión del Sistema con respecto a la SINR de cada usuario.....	64
Fig. 3.12 Diagrama de las 20 subportadoras, y la potencia de cada uno de los UE-i's.....	65
Figura 3.13 Tasa de transmisión del escenario de simulación NOMA de 2 usuarios por subportadora, con $P1= 1/5P$ , y $P2=4/5P$ .....	65
Figura 3.14 Tasa de transmisión del escenario de simulación NOMA de 2 usuarios por subportadora, con $P1= 2/5P$ , y $P2=3/5P$ .....	66
Figura 4.1 Diagrama del primer escenario de la repartición de usuarios por sub-banda, Reparte los usuarios con respecto a su distancia de la RB, donde los usuarios más cercanos cuentan con la P1 y los siguientes 20 usuarios con la P2. ....	67
Figura 4.2 Suma de Tasas de Transmisión de la Fig. 4.1.....	68
Figura 4.3 Diagrama del Segundo escenario, división de usuarios por subportadora, donde cada subportadora cuenta con el primer usuario más cercano a la RB, y el segundo usuario más lejano de la RB. ....	69
Figura 4.4 Suma de Tasas de Transmisión del escenario de la fig. 4.3.....	70
Figura 4.5 Tercer escenario, las sub-bandas reciben a los usuarios con respecto a su distancia, .....	71
Figura 4.6 Suma de Tasa de Transmisión del escenario de la Figura 4.5. ....	72
Figura 4.8 Tasa de Transferencia de cada usuario, con el escenario 2 de la fig. 4.3, con un ancho de banda de 600MHz. ....	73
Figura 4.9 Suma de Tasas de Transferencia de los UE-l's de la Fig. 4.8, repartiendo los usuarios entre las subbandas como el escenario dos de la Figura 4.3.....	73

## Índice de tablas

Tabla 1.1 Características de 1G .....	10
Tabla 1.2 Características de 2G .....	12
Tabla 1.3 Características de 3G .....	14
Tabla 1.4 Características de 4G .....	17
Tabla 2.1 Definición de tipos de celda.....	26
Tabla 2.2 Terminología para los Modelos de Perdida de Camino.....	27
Tabla 2.3 Frecuencia de operación LTE de las principales compañías telefónicas de México .....	31
Tabla 2.4 Parámetros de Cost 231 Hata.....	34
Tabla 2.5 Constantes del Modelo Ericsson 9999.....	35
Tabla 2.6 Parámetros a, b y c categorías A, B y C.....	38

## **Objetivo general**

Desarrollar una metodología de asignación de usuarios que maximice la suma de tasas en sistemas celulares basados en NOMA.

## **Objetivos específicos**

- Realizar un estudio detallado sobre el estado del arte de los sistemas celulares.
- Desarrollar un estudio sobre los sistemas con ondas milimétricas.
- Evaluar el desempeño de los sistemas celulares NOMA y OMA mediante la SIR y la tasa de transmisión.
- Evaluar los esquemas de asignación de usuarios para maximizar la suma de tasas en sistemas celulares basados en NOMA.

## **CAPÍTULO 1 Evolución de los Sistemas Celulares**

### **1.1 Introducción**

Los sistemas celulares desde su nacimiento han evolucionado de un modo inimaginable en cuanto a su cobertura, servicios y tecnología, este crecimiento es debido fundamentalmente, al auge experimentado por la telefonía celular digital que permite a sus usuarios en todo el mundo mandar y recibir información prácticamente en cualquier lugar, aun si se están moviendo de un lugar a otro, la movilidad se ha convertido por tanto en un aspecto clave sobre el cual se apoyan los índices de crecimiento de los sistemas celulares, que además se espera de estos un incremento en los próximos años del orden de 1000 veces, comparado con lo que actualmente se experimenta.

Este primer capítulo describe la evolución de dichos sistemas de telefonía empezando por la primera generación de sistemas celulares (1G) la cual se caracterizó por ser analógica y únicamente para voz, hasta llegar a 5G, la siguiente generación de redes móviles.

Aunque la tecnología 4G por ahora cubre las necesidades de los usuarios, evidentemente y según los analistas no será capaz de cubrir los requisitos para las aplicaciones que se presentaran en los próximos años. Para poder lidiar con la crisis del espectro a la que indudablemente se va a enfrentar, se necesita una combinación de muchas tecnologías, como las expuestas en el capítulo anterior.

En el segundo capítulo hablaremos que son las ondas milimétricas, de los rangos de las frecuencias en las que operan y por qué se piensa utilizar este rango de frecuencias como una de las tecnologías propuestas para 5G, donde hablaremos sobre sus modelos de propagación así como las

Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA recomendaciones que da la ITU sobre el uso de ondas milimétricas, donde se describirán algunos ejemplos de sus usos

En el tercer capítulo abarcaremos por qué NOMA se ha identificado como una técnica prometedora de acceso múltiple, y como optimiza la asignación de recursos al repartir los usuarios en el dominio de la potencia.

También se hablara de la relación señal/interferencia más ruido de los sistemas y como su análisis es una pieza clave para el diseño de redes inalámbricas.

En este capítulo se presenta el análisis de la SINR para diferentes escenarios, se muestra para el caso de OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal), tecnología utilizada en 4G y para el caso del Acceso Múltiple No Ortogonal (por sus siglas en inglés, NOMA).

Por último, en el cuarto capítulo, se realizará la evaluación de la suma de tasas de transferencia de datos en NOMA, analizando diferentes esquemas de asignación de potencia, para así determinar cuál de dichas asignaciones maximiza la suma de tasas del sistema. En este capítulo se realizará la evaluación de la suma de tasas de transferencia para 3 esquemas de asignación diferentes utilizando NOMA.

## **1.2 Técnicas de acceso múltiple**

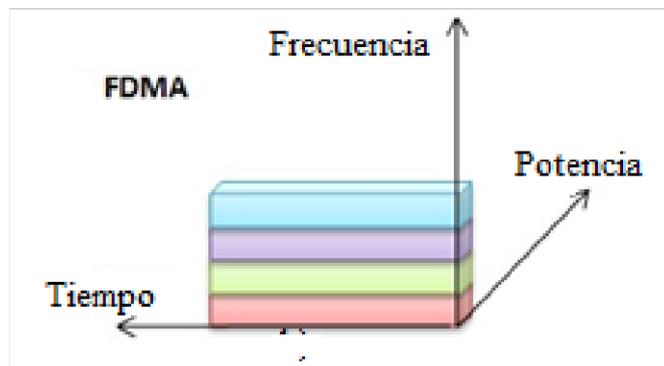
Un método o técnica de acceso múltiple permite a un número determinado de usuarios conectados a un mismo medio, transmitir y recibir información compartiendo los recursos, por recursos de una red nos referimos a tiempo, ancho de banda y potencia. Hay varios tipos de métodos de acceso múltiple según la manera que tengan de dividir los recursos del medio. Las técnicas principales son el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, por sus siglas en ingles), el acceso múltiple por división de tiempo (FDMA, por sus siglas en ingles) y el acceso múltiple por división de código

Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA (CDMA, por sus siglas en inglés); además de OFDMA (Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal, por sus siglas en inglés) que se utiliza actualmente en los sistemas LTE.

### 1.2.1 FDMA

Una de las primeras técnicas implementadas para compartir un canal de transmisión entre distintos usuarios es el llamado Acceso Múltiple por División de Frecuencia (Frequency Division Multiple Access por sus siglas en inglés), en esta técnica de acceso al medio, el ancho de banda se divide entre múltiples usuarios, asignando a cada uno de ellos una subportadora, así cada usuario tiene una porción del ancho de banda por todo el tiempo disponible para transmitir su información.

En la Figura 1.1 se muestra la forma en que se reparten los recursos en FDMA.



*Figura 1.1 FDMA, cada usuario transmite sin limitaciones en tiempo, pero usando solo una porción del ancho de banda disponible.*

Entre cada uno de los intervalos de frecuencia que se tienen para los distintos usuarios se tiene una *banda de guarda* la cual es utilizada para asegurar que entre los usuarios no ocurra interferencia, la banda de guarda es de mucha utilidad cuando existen retardos, ecos o reflexión. En la Figura 1.2 se muestra un ejemplo de cómo se implementa la banda de guarda, se observa que entre cada

Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA subportadora (que se asigna a los usuarios) se deja un intervalo de frecuencias, el cual es dicha banda.

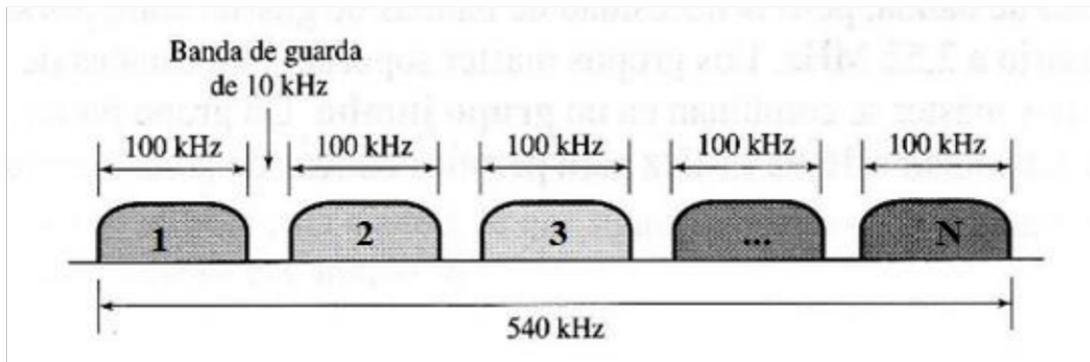


Figura 1.2 Banda de guarda, se divide el ancho de banda total en subportadoras y entre cada una de ellas existe un intervalo de guarda.

Como se puede observar, entre cada uno de los usuarios (numerados del 1, 2,..., hasta N) hay una separación la cual es la Banda de Guarda ( $W_g$ ), el cual abarca un ancho de banda del canal, un dato importante a notar es el hecho de que el ancho de banda total del canal está dado por el número total de usuarios multiplicado por el valor de la Sub Banda ( $W_c$ ), el cual es el ancho de banda ocupado por la banda de guarda y el que ocupa un usuario.

$$\text{Ancho de Banda Total } W = NW_c \quad (1.1)$$

Esta técnica de multiplexación fue muy implementada en protocolos de comunicación, tanto digitales como analógicos, principalmente la radiofrecuencia y los teléfonos móviles que implementan redes GSM.

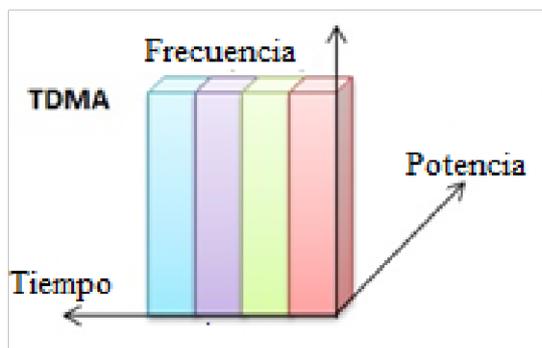
Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA

Pese a que las técnicas FDMA presentan la desventaja de una exigente sincronización en frecuencia, implementaciones ingeniosas como OFDMA poseen numerosos beneficios frente a TDMA o CDMA como la robustez al multitrayecto.

### 1.2.2 TDMA

Una de las técnicas para compartir el canal de transmisión entre varios usuarios es el llamado Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA, por sus siglas en inglés), el cual consiste en asignar a cada usuario la totalidad del ancho de banda disponible en el canal de transmisión por una corta duración de tiempo (ranuras de tiempo). Las regiones de tiempo no utilizadas entre las regiones asignadas son llamadas “tiempos de guarda” que cumplen la misma función que las bandas de guarda en FDMA, utilizados para que no haya interferencia entre los usuarios.

En la Figura 1.3 se muestra la representación gráfica de un sistema TDMA.



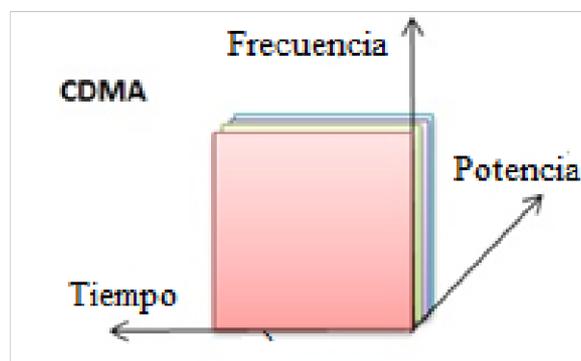
*Figura 1.3 TDMA, cada usuario transmite usando todo el ancho de banda disponible, pero solo por un intervalo de tiempo definido.*

Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA TDMA separa a los usuarios en ranuras de tiempo, esto asegura que los usuarios no experimenten ningún tipo de interferencia por transmisiones simultáneas. En comunicaciones móviles TDMA es utilizado en casi todos los sistemas de segunda generación, destacando GSM.

### 1.2.3 CDMA

En el Acceso Múltiple por División de Código (CDMA), todos los usuarios tienen acceso todo el tiempo a toda la banda de frecuencia. Para poder distinguir una señal de otra, se utiliza algún código, de manera que cada receptor responda de manera única a su señal particular la cual tiene su código. CDMA es una aplicación de las técnicas de espectro ensanchado (spread-spectrum), estas técnicas pueden ser divididas en dos grupos: el espectro ensanchado por secuencia directa (DS CDMA) y el espectro ensanchado por salto de frecuencia (FH CDMA).

En la Figura 1.4 se observa la asignación de recursos en CDMA, donde todos los usuarios tienen acceso a todo el ancho de banda por todo el tiempo disponible.



*Figura 1.4 CDMA, cada usuario transmite usando todo el ancho de banda, por todo el tiempo disponible, diferenciándose por un código asignado a cada usuario*

## **FH-CDMA**

Esta técnica consiste en tomar la señal de transmisión y modularla con una portadora que realiza “saltos” de frecuencia en frecuencia en función del tiempo dentro de un ancho de banda asignado. Este cambio constante de frecuencia de la portadora reduce la interferencia producida por otra señal de banda angosta. Un patrón de salto es proporcionado por un generador pseudo aleatorio que determina el orden de uso y la frecuencia por la que se transmitirá. El receptor debe disponer del mismo patrón de salto y estar en sincronía con el transmisor para conocer la frecuencia de la señal en el momento correcto.

Con esta técnica es posible que varios usuarios utilicen la misma frecuencia sin que se interfieran debido a que cada usuario emplea un patrón de salto diferente.

## **DS-CDMA**

Usando esta técnica cada bit de la señal original es representado por múltiples bits usándose un código de ensanchamiento, este código esparce la señal dentro de un ancho de banda en proporción directa al número de bits utilizados. Así al generar una señal de espectro expandido se utiliza un ancho de banda mayor que el mínimo requerido para transmitir la información deseada.

El código usado para esparcir la información es independiente al de la información y tiene una velocidad de transmisión mayor al de la señal de información. El receptor debe contar con el código de ensanchamiento correcto para recuperar la información.

#### 1.2.4 OFDMA

Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA) es una técnica de acceso múltiple para aplicaciones móviles y está basada en OFDM. Se implementa principalmente para que distintos usuarios de un sistema de telecomunicaciones puedan compartir el espectro de un canal, esto implementado principalmente para actividades de baja velocidad.

OFDMA se cataloga como una técnica de modulación y de acceso múltiple el cual se consigue dividiendo el canal en un conjunto de subportadoras las cuales se reparten según la función que el usuario requiera, esto permite que cada usuario cuente con una diferente calidad de servicio según las necesidades que este tenga.

A diferencia de OFDM donde las subportadoras transmiten el mismo nivel de energía sin importar la cantidad de información que transmitan, en OFDMA puede transmitir diferentes cantidades de energía según la cantidad de información que cada subportadora lleve consigo.

OFDMA es una técnica de acceso múltiple que divide el ancho de banda en múltiples frecuencias subportadoras, muy juntas entre si sin causar interferencia, removiendo las bandas de guarda entre subportadoras adyacentes; donde todas las subportadoras son ortogonales entre ellas, de tal modo que cuando una de las subportadoras alcance su amplitud máxima, las demás pasaran por cero (como se muestra en la Figura 1.5), por lo que no se interfieren.

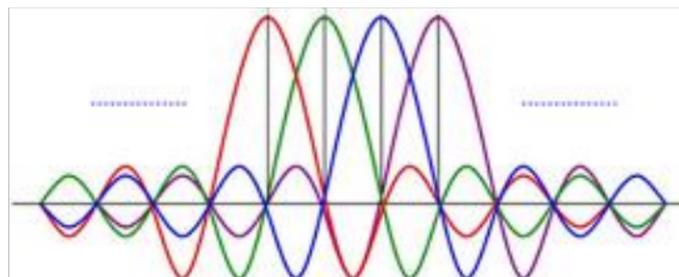


Figura 1.5 Ejemplo señales ortogonales en sistemas OFDMA.

### **1.3 Sistemas celulares basados en conmutación de circuitos**

Existen dos tipos de conmutación, conmutación de paquetes, de la cual hablaremos más adelante y comunicación basada en circuitos, que dedica un canal únicamente a la sesión actual (llamada), al terminar dicha sesión, el circuito es liberado para poder ser usado por otros usuarios, en esta sección se describirán brevemente algunas tecnologías que utilizan este tipo de conmutación.

La comunicación por conmutación de circuitos está compuesta por tres fases:

1. Establecimiento del circuito.
2. Transferencia de datos.
3. Desconexión del circuito.

Una vez que estos pasos son llevados a cabo y se fija el trayecto entre origen y destino, queda reservado un ancho de banda durante el tiempo que dure la conexión, cuando la conexión termina el ancho de banda deja de ser reservado.

En el caso de que el origen quisiera comunicarse con otro destino, el origen primeramente debe finalizar conexión establecida. Los nodos deben tener capacidad de conmutación y de canal suficiente para poder congestionar la conexión solicitada.

#### **1.3.1 Primera generación: Sistemas Analógicos**

La red de radio móvil 1G apareció hasta los años 80's cuando se introducen los teléfonos "celulares", basados en las redes celulares con múltiples estaciones de base relativamente cercanas una de otras. Estos sistemas celulares estaban basados en tecnologías analógicas dedicadas a proporcionar servicios de voz, donde cada llamada usaba un canal de frecuencia de banda estrecha, eran con calidad de enlaces muy reducida, la velocidad de conexión no era mayor de 2400 baudios.

En cuanto a la transferencia de celdas era muy imprecisa ya que contaban con una baja capacidad, lo que limitaba notablemente la cantidad de usuarios que el servicio podía ofrecer de forma simultánea.

Tenía capacidad para ofrecer servicios de comunicación de voz sobre conmutación de circuitos, lo cual significa que existía un circuito por llamada, y hasta que dicha llamada terminara, se liberaba el circuito para poder usarse por más usuarios. Una de las limitaciones era que la señalización se realizaba en banda, por lo que además de ser perceptible y no tener seguridad, no permitía el uso de módems y telefaxes.

En la Tabla 1.1 se realiza un resumen de las características generales de la primera generación de redes celulares.

Tabla 1.1 Características de 1G

Primera generación (1G)						
Estándar	AMPS		ETACS		NTACS	
Año de introducción	1983		1985		1988	
Bandas de frecuencia (MHz)	DL	UL	DL	UL	DL	UL
	869- 894	824- 849	916- 949	871- 904	869- 894	824- 849
Ancho de banda de canal	30kHz		25kHz		12.5kHz	
Acceso Multiple	FDMA		FDMA		FDMA	
Duplexaje	FDD		FDD		FDD	
Modulación	FM		FM		FM	
Número de canales	832		1240		400	

### **1.3.2 Segunda generación: Sistemas digitales y el caso de GSM**

Las limitaciones de los sistemas de primera generación impulsaron el desarrollo de la segunda generación que se introdujo en los años 90, dando el salto de lo analógico a lo digital. Al igual que en la primera generación se desarrollaron varios estándares, entre los que se cuentan:

- GSM (Global System for Mobile Communications)
- IS-95
- D-AMPS o IS-136 (Digital Advance Mobile Phone System)

Siendo GSM el que se estandarizó a nivel mundial, el desarrollo del Sistema Global de Comunicaciones Móviles (GSM, por sus siglas en inglés), fue impulsado por el “Special Mobile Group Telecommunications” (ETSI). La tecnología GSM fue la primera en facilitar voz y datos digitales, así como roaming internacional permitiendo al usuario ir de un lugar a otro.

La capa física de GSM está basada en TDMA, que es un tema que ya abordamos, y División por Duplexación por Frecuencia (FDD).

Los principales servicios son la voz y datos conmutados en macro células, logrando una velocidad de 9.6 kbps.

La especificación de GSM está dividida en dos fases, esto permitió la implementación rápida de servicios comunes durante la primera fase, como la telefonía o el corto servicio de mensajes.

En la fase 1, la sincronización de subsistema de radio fue incluida para mejorar las transiciones de traspaso y programar transmisiones de usuario, por todo el tiempo de ida y vuelta. El RTT resultó en el avance de tiempo (TA) que los dispositivos móviles deberían aplicarse para tener transmisión de enlace ascendente

En la fase 2, la Diferencia de Tiempo Observada (OTD) como una función de sincronización opcional, basada en la diferencia horaria entre BS medidos por el dispositivo móvil.

La tecnología digital pronto necesito mejorar ante las necesidades crecientes de los usuarios, por ello se desarrollaron mejoras y evoluciones del sistema GSM, estas mejoras se manifiestan en los siguientes sistemas:

- 2.5G GPRS (General Packet Radio Service) de hasta 114 kbps.
- 2.75G E-GPRS (Enhanced GPRS) de hasta 384 kbps, también conocida como EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolutions).

En la Tabla 1.2 se realiza un resumen de las características generales de la segunda generación de redes celulares.

Tabla 1.2 Características de 2G

Segunda generación (2G)			
	GSM Europa, Asia	IS-136, NADC Norteamérica	IS-95 Norteamérica
Año de introducción	1990	1991	1993
Estación base Bandas de transmisión (MHz)	935-960	869-894	869-894
Estación móvil Bandas de transmisión (MHz)	890-915	824-849	824-849
Máxima potencia (watts)	20	3	0.2
Número de canales dúplex	125	832	20

## Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA

Ancho de banda del canal (kHz)	200	30	1250
Método de acceso al canal	TDMA	TDMA	CDMA
Duplexaje	FDD	FDD	FDD
Usuarios por canal	8	3	35
Tipo de Modulación	GMSK	$\pi/4$ DQPSK	QPSK
Velocidad de datos	270.833 kb/s	48.6 kb/s	9.6 kb/s

### 1.3.3 Tercera generación

La tercera generación de comunicaciones móviles, mejor conocida como 3G, se basó en la transmisión de voz y datos mediante UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)

Los servicios que esta tecnología brindaba eran contar con la posibilidad de transferir voz y datos-no voz (datos como lo son correo electrónico, mensajería instantánea, aplicaciones, entre otros) con una mayor velocidad de transferencia.

El avance de la tecnología 2G a 3G tuvo un cambio significativo en cuanto a la transmisión de datos. Como se mencionó anteriormente las redes 2G estaban basadas en la transmisión de voz, el problema con esta generación fue que la transferencia era lenta y con la demanda de usuarios en constante crecimiento y con la necesidad de transferir mayores cantidades de datos, se dio la necesidad de actualizar las tecnologías de comunicaciones, así en la búsqueda de cumplir con las exigencias de los usuarios el paso de la tecnología 2G a 3G se dio de forma paulatina pasando por varias fases.

Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA De 2G a 2.5G en donde se dio uno de los pasos importantes para la evolución 2G cuando entro el Servicio General de Paquetes vía Radio (GPRS). Con estos servicios de los dispositivos móviles relacionados con el GPRS fua así que surge el 2.5G.

El GPRS podía dar velocidades de datos desde 56 kbits/s hasta 114 kbits/s. Estas características pueden usarse para servicios como el acceso al protocolo de aplicaciones inalámbricas, conocidas como WAP (Wireless Application Protocol), servicios de mensajes cortos (SMS- Short Messaging Service), sistema de mensajería multimedia (MMS-Multimedia Messaging Service) y para servicios de comunicación por internet como lo son el email y el acceso a la web.

Con el avance a la 3G se dieron mejoras sustanciales en la transferencia de datos, contaba con High-Speed Packet Access (HSPA) el cual era una fusión de dos protocolos móviles, estos dos protocolos son respectivamente el High Speed Downlink Packets Access y High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) que extiende y mejora el rendimiento de las redes de telecomunicaciones móviles de la tercera generación.

En el caso de la seguridad, las redes 3G ofrecía mayor grado de seguridad en comparación a su predecesora 2G, esto al permitir a la UE autenticar la red a la que se está conectando. Las redes 3G usan un cifrado por bloques KASUMI en vez del anterior cifrado de flujo A5/1.

En la Tabla 1.3 se muestran las características de algunos de los estándares implementados en 3G:

Tabla 1.3 Características de 3G

Tercera generación (3G)				
	W-CDMA	CDMA2000 1X	EV-DO	HSPA
Estándar	3GPP	3GPP2	3GPP2	3GPP

## Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA

Bandas de Frecuencia	859/900 MHz 1.8/1.9/2.1 GHZ	450/850 MHz 1.7/1.9/2.1 GHZ	450/850 MHz 1.7/1.9/2.1 GHZ	859/900 MHz 1.8/1.9/2.1 GHZ
Ancho de banda del canal	5 MHz	1.25 MHz	1.25 MHz	5 MHz
Velocidad de datos	384-2048kbps	307kbps	Enlace Descendente:2.4- 4.9 Mbps Enlace Ascendente:800- 1800kbps	Enlace Descendente:3.6- 14.4 Mbps Enlace Ascendente:2.3- 5Mbps
Tasa de usuario típica	150-300 kbps	120-200kbps	400-600 kbps	500-700 kbps
Latencia	100-200ms	500-600ms	50-200ms	70-90ms
Acceso Múltiple	CDMA	CDMA	CDMA/TDMA	CDMA/TDMA
Duplexaje	FDD	FDD	FDD	FDD
Modulación	QPSK	BPSK, QPSK	QPSK,8PSK y 16QAM	QPSK,16QAM y 64QAM

### 1.4 Sistemas celulares basados en conmutación de paquetes

La conmutación de paquetes se divide de dos formas diferentes, la primera es conocida como conmutación sin conexión o conmutación de datagrama, y la segunda como conmutación con conexión o conmutación con circuitos virtuales.

La conmutación por datagrama, los paquetes se enrutan individualmente, a veces dando como resultado rutas diferentes y entrega fuera de orden. Cada paquete está etiquetado con una dirección de destino, dirección de origen y números de puerto. Este tipo de conmutación está basado en el protocolo UDP

La conmutación por Circuitos virtuales, los paquetes incluyen un identificador de conexión en lugar de información de dirección y se negocian entre puntos finales para que se entreguen en orden y con

Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA  
verificación de errores. La información de dirección solo se transfiere a cada nodo durante la fase de configuración de la conexión, cuando se descubre la ruta al destino y se agrega una entrada a la tabla de conmutación en cada nodo de red por el que pasa la conexión. Este tipo de conmutación está basada en el protocolo TCP.

#### **1.4.1 Cuarta generación**

“4G” son las siglas usadas comúnmente para referirse a la cuarta generación de telefonía móvil. La tecnología 4G es la sucesora de las tecnologías implementadas antes de ella como lo fueron 2G y 3G.

Al igual que se realizó con las generaciones anteriores, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) fue la encargada de crear un comité el cual se encargó de definir las especificaciones de esta generación. Este comité creado por la UIT es el IMT-Advanced y en él se definieron los requisitos que deberían ser considerados para que un estándar sea del tipo 4G.

Entre los requisitos técnicos que se consideran debe de cumplir un estándar para ser considerado 4G, los más claros con los que se deben de cumplir son que las velocidades máximas de transmisión de datos deberán de estar entre los 100 Mbits/s (12.5 MB/s) para una movilidad en alta y 1 Gbit/s (125 MB/s) para una movilidad en baja.

La tecnología 4G está basada completamente en el protocolo IP, siendo así un sistema y una red, que se alcanza debido a la convergencia entre las redes de cable e inalámbricas. Las ventajas de esta tecnología a comparación de sus predecesoras es el hecho de que podrá ser usada por módems inalámbricos, dispositivos móviles inteligentes y otros dispositivos móviles.

Actualmente Long Term Evolution (LTE, por sus siglas en inglés), se comercializa como 4G es el nombre del proyecto dado al desarrollo de una interfaz aérea de alto rendimiento para sistemas de

Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA comunicaciones móviles celulares. El trabajo sobre LTE se remonta al año 2004, con el objetivo general de proveer una nueva tecnología de acceso por radio enfocada solo en la conmutación de paquetes.

De forma paralela al desarrollo de LTE, también se llevó a cabo la evolución de la arquitectura general de la red 3GPP, denominada Evolución del Sistema de Arquitectura (SAE), incluyendo ambos la red de acceso de radio y la red de núcleo.

LTE utiliza para enlace de subida SC-FDMA (Single Carrier FDMA) y OFDMA (Ortogonal Frequency Division Multiple Acces) para el enlace de bajada, algunas de las ventajas de OFDMA son las mismas que en OFDM como lo es complejidad relativamente baja y la creación de diversidad de frecuencias, además de que OFDMA es una técnica flexible de acceso múltiple que puede acomodar a muchos usuarios, tasas de datos y calidad de servicio diferentes. Además, las velocidades de datos más bajas se pueden manejar mucho más eficientemente. Por otro lado, la alta relación de potencia de pico a promedio (PAPR) asociada con OFDM llevó al 3GPP a buscar un esquema de modulación diferente para el enlace ascendente de LTE. SC-FDMA combina las técnicas de bajo PAPR de los sistemas de transmisión de una sola portadora, como GSM y CDMA, con la resistencia multitrayecto y la asignación de frecuencia flexible de OFDMA.

Tabla 1.4 Características de 4G

<b>Cuarta generación (4G)</b>		
	<b>LTE</b>	<b>WiMax</b>
Estándar	3GPP Revisión 8	IEEE 802.16e
Bandas de frecuencia	1900 MHz	

<b>Cuarta generación (4G)</b>		
	<b>LTE</b>	<b>WiMax</b>
Ancho de banda de canal	1,4,3,5,10,15,20 MHz	5,7,8,10 MHz
Tasa de datos (enlace de bajada)	150 Mbps	46 Mbps y 32 Mbps
Tasa de datos (enlace de subida)	75 Mbps	7 Mbps y 4Mbps
Latencia	5-15 ms	15-40 ms
Acceso Múltiple (enlace de bajada)	OFDMA	OFDMA
Acceso Múltiple (enlace de subida)	SC-OFDMA	OFDMA
Duplexaje	FDD Y TDD	TDD
Modulación	QPSK, 16QAM y 64QAM	QPSK, 16QAM y 64QAM

### **1.5 Propuestas para 5G**

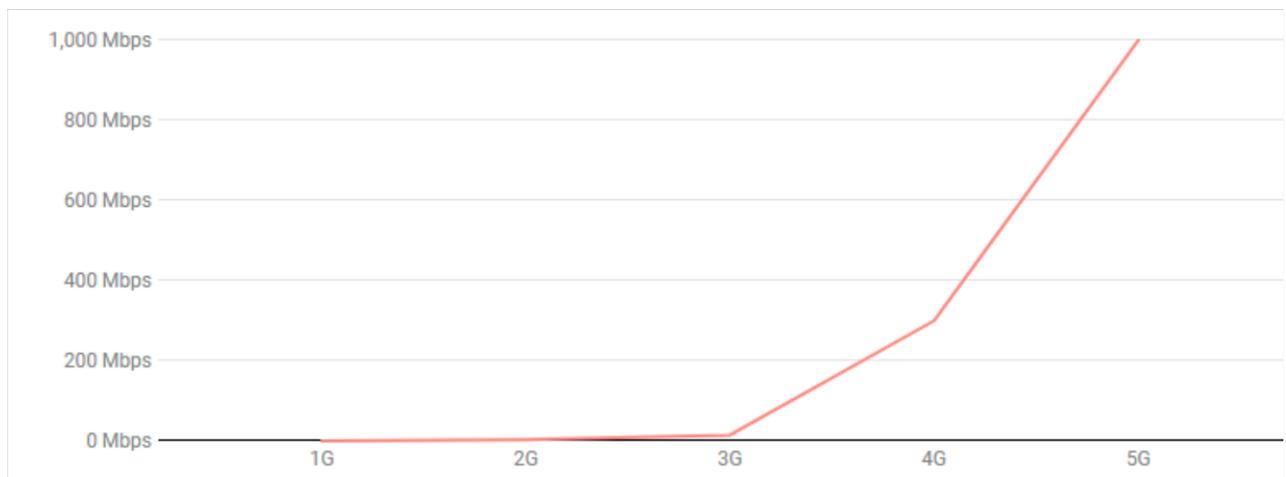
La creciente demanda en la telefonía móvil representa un reto para la siguiente generación de redes de comunicación, el rápido crecimiento móvil ha impulsado un aumento exponencial, la necesidad de comunicación está en aumento y cada vez necesitamos servicios de mejor calidad, más rápidos y eficientes.

Actualmente los servicios de la red 4G están puestos en marcha en muchos países (o están por implementarse), sin embargo, con una explosión de dispositivos y servicios móviles inalámbricos, todavía hay algunos desafíos que no pueden ser atendidos ni siquiera por 4G, como la crisis del espectro y el alto consumo de energía, 5G promete afrontar dichos desafíos.

Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA

Desde la década de 1980 hasta lo que se espera para 2020, cada generación de transmisión inalámbrica ha enviado y recibido más datos en menos tiempo, con importantes mejoras en los últimos años.

En la Figura 1.6 se observa el incremento en la tasa de transmisión de cada generación empezando por 1G, hasta lo que se espera tener en 5G.



*Figura 1.6 Aumento en la tasa de transmisión de datos móviles*

La tecnología 5G se basa en las siguientes propuestas para su implementación:

- **Ondas milimétricas**

Actualmente debido a que el rango que comprende las microondas se ha visto superado en su capacidad, se han tenido que buscar alternativas, lo que ha llevado a la utilización de ondas milimétricas (en inglés mmWave), dichas ondas están comprendidas en un rango que va de los 30 a 300 GHz.

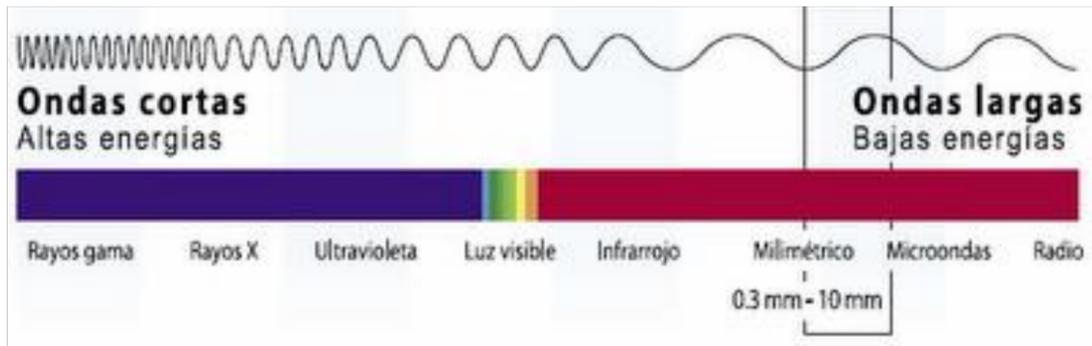


Figura 1.7 Espectro Electromagnético

- **MIMO Masivo**

Las futuras redes 5G van a requerir grandes incrementos en capacidad, inalcanzables con las actuales soluciones de 4G. Las aplicaciones de la tecnología de múltiple entrada, múltiple salida (MIMO) como MIMO Masivo prometen enormes ganancias en la capacidad y eficiencia espectral al usar un gran número de antenas. Por lo tanto, es una tecnología clave para hacer la transición de 4G a 5G.

MIMO masivo propone utilizar un número considerable de antenas para multiplexar mensajes para varios dispositivos, enfocando la energía radiada hacia las direcciones deseadas mientras se minimiza la interferencia intra e intercelular. MIMO Masivo puede requerir grandes cambios arquitectónicos, particularmente en el diseño de macro estaciones base, y también puede conducir a nuevos tipos de implementaciones.

- **NOMA**

En los esquemas convencionales de OMA (Acceso Múltiple Ortogonal, por sus siglas en inglés), se asignan múltiples usuarios con recursos ortogonales en el tiempo, la frecuencia o el dominio del

Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA código. Idealmente, no existe interferencia entre múltiples usuarios debido a la asignación de recursos ortogonales en OMA, por lo que la detección simple de un solo usuario se puede utilizar para separar las señales de los usuarios. NOMA ha sido investigado para tratar los problemas de OMA. Básicamente, NOMA permite interferencias controlables mediante la asignación de recursos no ortogonales con el aumento tolerable en la complejidad del receptor. Comparado con OMA, las principales ventajas de NOMA incluyen lo siguiente.

- Eficiencia espectral mejorada
- Conectividad masiva
- Baja latencia de transmisión y costo de señalización
- **D2D**

La comunicación D2D, dispositivo a dispositivo, permite que dos móviles que están físicamente cerca se conecten entre sí sin pasar por una estación intermedia, evitando interferencias. El problema es que la localización del contacto requiere mucha energía,

Antes de 2020 se espera que los teléfonos inteligentes hayan incorporado las capacidades de comunicación dispositivo a dispositivo (D2D), entre aparatos que se encuentren geográficamente cerca.

Estas comunicaciones están ampliamente reconocidas como fundamentales para las redes 5G que se están desarrollando.

- **M2M**

El concepto de “machine to machine” se refiere al intercambio de información o comunicación en forma de datos entre dos máquinas remotas. Todo entorno M2M debe contar con los siguientes elementos: las máquinas que se encargan de gestionar la información entre ellas; los dispositivos

Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA M2M que se conectan a una máquina remota y proveen de comunicación al servidor; el servidor que gestiona el envío y la recepción de la información, y la red de comunicación por cable o a través de redes inalámbricas.

Estos procesos reducen el tiempo y los costes, y amplían servicios que hasta ahora no teníamos. Así mismo esta comunicación se realiza de manera telemática (por la convergencia entre las tecnologías de las Telecomunicaciones y de la Informática) a través de redes privadas e inalámbricas. Estas herramientas aumentan la productividad, automatización y eliminación manual, haciéndonos la vida más cómoda y segura.

## **1.6 Introducción a las ondas milimétricas**

Las ondas milimétricas son ondas electromagnéticas que ocupan una banda de frecuencia extremadamente alta (30 GHz a 300 GHz) del espectro de frecuencia de radio. Esta banda de frecuencia tiene una longitud de onda de 1 mm a 10 mm y, por lo tanto, se denominan ondas milimétricas. Se encuentran en el rango común de la longitud de onda de microondas y el infrarrojo lejano, por eso comparte las características espectrales de ambos.

Las tecnologías de ondas milimétricas ya se han estandarizado para servicios de corto alcance (IEEE 802.11ad) y se han implementado para aplicaciones de nicho como backhaul de células pequeñas.

## **CAPÍTULO 2 Ondas Milimétricas en los Sistemas Celulares 5G**

### **2.1 Espectro de operación**

La banda de las ondas milimétricas (mm Waves), también llamada EHF (por sus siglas en inglés Extremely High Frequency o Frecuencia Extremadamente Alta) va de los 30 a los 300 GHz y son llamadas así porque su longitud de onda abarca aproximadamente de 1 a 10 milímetros.

Estas ondas son parte de las llamadas microondas, ondas en el rango de frecuencia comprendido entre 300 MHz y 300 GHz, este rango incluye las bandas de UHF (ultra-High Frequency), SHF (Super High Frequency) y EHF (Extremely High Frequency). Las frecuencias por debajo de 50 GHz ya son explotadas de tal manera que surge la necesidad de buscar bandas de frecuencias que sean libres de usarse para los requerimientos futuros.

Las ondas milimétricas poseen altas atenuaciones debidas a la absorción atmosférica, por lo que solo puede operar a ciertas distancias y es sumamente direccional, a pesar de estas desventajas este tipo de ondas son de gran interés en el ámbito de las telecomunicaciones porque a las frecuencias a las que operan poseen una alta transmisión de datos, además de que las bandas en las que se encuentran dichas frecuencias se pueden usar libremente debido a que no están licenciadas.

Dentro de la banda de frecuencia de las Ondas milimétricas, se tiene dos sub-bandas ya conocidas, sobre las que se centra el interés actual, la banda-V (57 a 66 GHz) y la banda-E (71 a 76 GHz y 81 a 86 GHz)

### **2.2 Modelos de propagación**

En el ámbito de las comunicaciones móviles un modelo de propagación viene dado por una expresión matemática cuyo objeto es caracterizar la propagación de las ondas de radio en función

Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA de algún parámetro, como puede ser frecuencia, distancia o algún otro factor dependiendo de cada modelo.

En las comunicaciones inalámbricas es de mucha importancia considerar las pérdidas de propagación en las señales, estas pérdidas son un aspecto clave para para el modelado de los sistemas de comunicación los cuales están en función de la distancia y de la frecuencia. Existen diferentes tipos de modelos como lo son el determinístico, estocástico o empírico, donde estos últimos mencionados nos proveen un conocimiento basado en la experimentación de las características del canal.

Los modelos de pérdidas simulados y generados por medio de la experimentación siguen típicamente dos patrones:

- Los primeros a considerar son aquellos que cuentan con un punto de referencia basado en la física de la potencia recibida cerca de la antena, un modelo que considera esto es el modelo denominado “*close-in free space reference distance path loss model*” (CI).
- En segundo lugar, se consideran aquellos que se ajustan de forma matemática de acuerdo a las medidas experimentales sin ningún tipo de referencia, como por ejemplo el modelo denominado “*Floating Intercept*” (FI).

Estos modelos serán definidos más adelante.

Los distintos tipos de modelos de propagación se formulan teniendo en cuenta el entorno en el que se aplican.

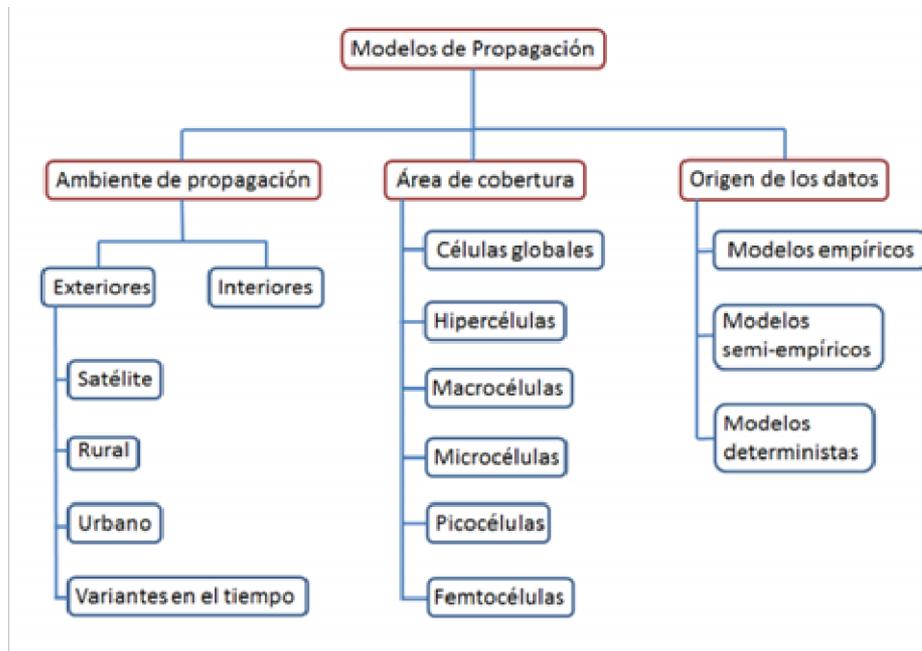


Figura 2.1 Clasificación de los modelos de propagación

En la Figura 2.1 se muestran los distintos modelos, a continuación, nos enfocaremos en los modelos según su ambiente de propagación.

### 2.2.1 Rec. UIT-R P.1411-8

Entre las recomendaciones de la ITU se encuentra la UIT-R P.1411-8 la cual proporciona normas sobre el modelado de la propagación de corto alcance en exteriores en la gama de frecuencias entre 300 MHz y 100 GHz. Además de proporcionar información sobre los modelos de pérdida de trayecto para entornos con visibilidad directa y sin visibilidad directa (LoS), pérdidas en la penetración en edificios (NLoS), modelos multitrayecto para la propagación entre calles y sobre los tejados, así como características de polarización de desvanecimiento [18].

Las Comunicaciones de corto alcance (distancia operativa menor a 1 km) son afectadas principalmente por las construcciones y árboles, que se da en las zonas urbanas y suburbanas en esta recomendación se definen las categorías de los trayectos de propagación cortos. Los entornos

Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA que describe esta recomendación se clasifican únicamente desde un punto de la propagación radioeléctrica, dicha propagación, se ve influida por el entorno, a continuación, se muestra un diagrama con los entornos de funcionamiento.

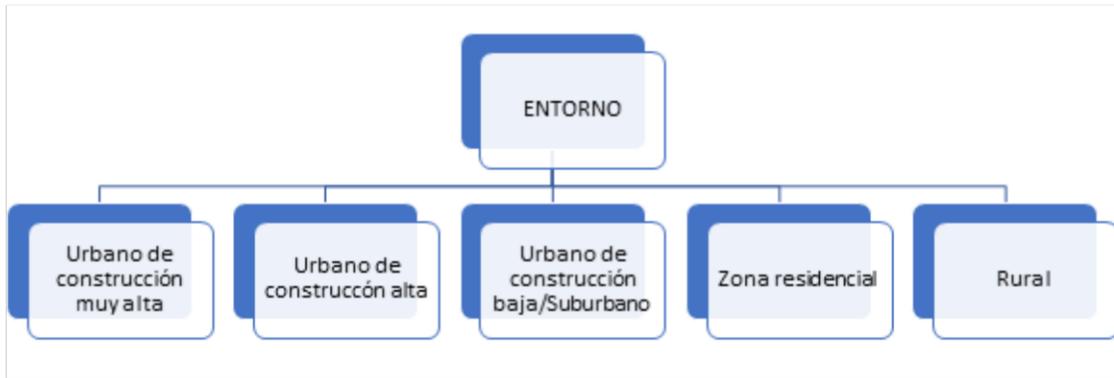


Figura 2.2 Entornos de funcionamiento físico

De la Figura 2.2 se tiene que para cada uno de los cinco entornos distintos se consideran dos casos posibles de velocidades típicas de los móviles, se dividen a los usuarios según se trate de peatones o vehículos. Además, el tipo de mecanismo de propagación depende también de la Altura de la antena de la estación base con relación a los edificios circundantes En la Tabla 2.1 que se muestra a continuación se resumen los tipos de células, dependiendo de la posición de la antena.

Tabla 2.1 Definición de tipos de celda

Tipo de celda	Radio de la celda	Posición típica de la antena
<b>Macro celda</b>	0.05 a 1km	Exteriores montada por encima del nivel medio de los tejados.
<b>Macro celda Urbana Densa</b>	0.05 a 0.5 km	Exteriores montada por abajo del nivel medio de los tejados.
<b>Pico celda</b>	Hasta 50m	Interiores o exteriores

Como se describe en la tabla anterior se consideran tres niveles para la ubicación de las antenas las cuales son:

1. Por encima de los tejados
2. Por debajo de los tejados, pero por encima del nivel de la cabeza
3. Al mismo nivel o por debajo del nivel de la cabeza

Para los casos típicos de las zonas urbanas pueden aplicarse algunos algoritmos de tipo cerrado. Estos modelos de propagación pueden utilizarse para los cálculos específicos del emplazamiento o para los generales. El tipo de modelo depende también de la gama de frecuencias. Han de aplicarse modelos distintos para la propagación en ondas disimétricas y milimétricas. En la gama de frecuencias de ondas disimétricas, se consideran situaciones LoS (Line of Sight) y NLoS (No Line of Sight). En el caso de propagación en ondas milimétricas, sólo se considera la LoS. En esta última gama de frecuencias se ha de considerar también la atenuación por el oxígeno y los hidrometeoros

Tabla 2.2 Terminología para los Modelos de Perdida de Camino

LOS	Se utiliza para describir un trayecto en el cual entre le Transmisor y el Receptor no se encuentran objetos que los obstruyan.
NLOS	Se utiliza para describir un trayecto el cual cuenta con obstrucciones entre la

	ubicación del Transmisor y la ubicación del receptor.
--	--

### **2.2.2 Rec. UIT-R P.1238-8**

En esta recomendación de la ITU se proporciona orientación sobre la propagación en interiores en la gama de frecuencias de 300 MHz y 100 GHz, y se brinda información sobre los modelos de pérdida de trayecto, modelos de dispersión de retardo, los efectos del diagrama de radiación de antena y de la polarización, los efectos de la ubicación del transmisor y el receptor, y del movimiento de los objetos en la sala [17].

En el caso de los sistemas de radioeléctricos en interiores, la predicción de su propagación es muy diferente en relación con los sistemas exteriores que vimos en la recomendación anterior. En interiores la cobertura depende notablemente de la geometría de los edificios, cuyos límites afectan a la propagación, por lo que se debe tener un conocimiento detallado del lugar de instalación. La gama de ondas muy cortas, como la utilización de ondas milimétricas, implica que los pequeños cambios en el entorno pueden afectar a las características de propagación del trayecto radioeléctrico.

Para establecer una clasificación de modelos se recurre a la información que se disponga del entorno, ya que la cobertura depende notablemente de la geometría, hasta los objetos y personas en movimiento en dicha sala. Tomando esto en cuenta se definen los siguientes modelos.

#### **Modelo Básico General**

Este modelo no diferencia en cuanto al lugar de instalación por lo tanto requiere poca información sobre el trayecto o el entorno, su expresión se muestra en la expresión 2.1

$$L_{Total}(f,d)[dB] = L_0(f,d_0)[dB] + n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + L_f \quad (2.1)$$

Donde:

$n$  : Coeficiente de pérdida de potencia debida a la distancia

$f$  : Frecuencia (MHz)

$d_0$  : Distancia de separación (m) entre la estación de base y el terminal portátil (siendo  $d < 1m$ )

$d_0$  : Distancia de referencia (m)  $L(d_0)$ : pérdida en el trayecto en  $d_0$  (dB), para una distancia de referencia de 1m, y suponiendo propagación en el espacio  $L(d_0) = 20 \log_{10}(f - 28)$ , donde  $f$  es en MHz

$L_f$  : Factor de pérdida debida a la penetración en el suelo (dB)

$n$  : Número de pisos entre la estación de base y el terminal portátil ( $n \geq 0$ ),  $L_f = 0dB$  para  $n = 0$

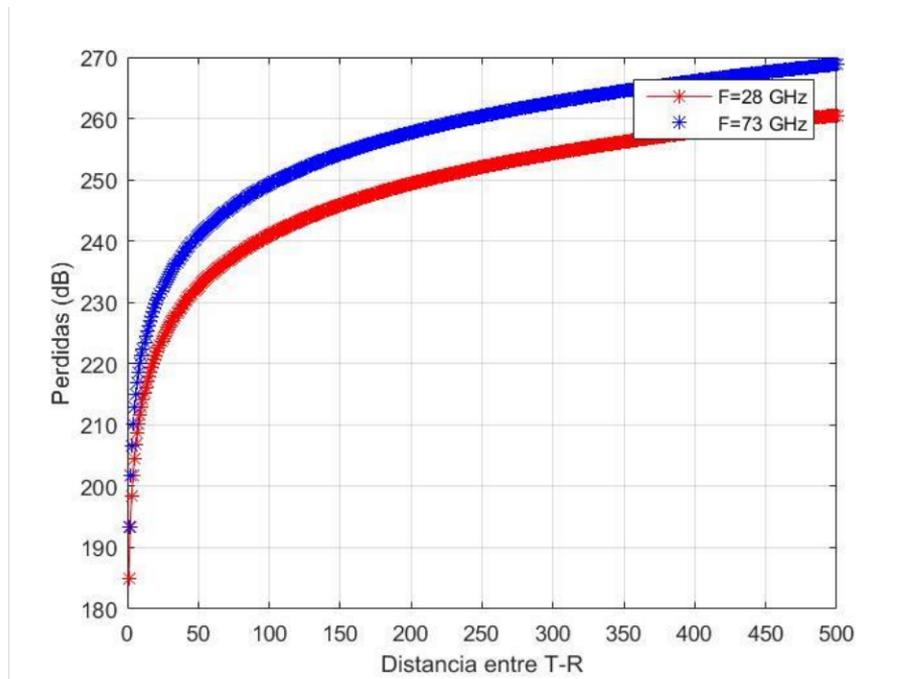


Figura 2.3 Pérdidas (dBs) de camino en el modelo general para interiores

En la Figura 2.3 podemos apreciar como al ser un modelo general, sufre mayores pérdidas de la señal al no considerar su entorno en su totalidad.

### Modelos Específicos en Cuanto al Lugar de Instalación

Para estimar la pérdida de trayecto o intensidad de cambio, también conviene utilizar modelos específicos en cuanto al lugar de instalación. Se dispone de modelos para predecir la intensidad de campo en interiores basados en la teoría uniforme de la difracción y técnicas de trazado de rayos. Estos modelos combinan elementos con el método electromagnético teórico de la teoría uniforme de la difracción, por lo que, al incluir los rayos reflejados y difractados, precisión de la predicción de la pérdida aumenta considerablemente.

Los modelos de propagación de pueden estudiar de diferentes formas según como se encuentren las condiciones entre la antena Transmisora y la antena Receptora. Podemos encontrar 2 tipos de formas de direccionar los modelos de perdida de camino con Línea De Vista (Line Of Sight por sus siglas en Ingles LOS) y Sin Línea De Vista (Non Light Of Sight por sus siglas en Ingles NLOS).

### 2.3 Modelos de Propagación en LTE

LTE es un estándar de comunicaciones inalámbricas de transmisión de datos de alta velocidad para teléfonos móviles y terminales de datos, este estándar fue propuesto por la *3rd Generation Partnership Project (3GPP)* y a día de hoy es uno de los más comercializados como tecnología 4G. LTE a mayores rasgos es una mejora de 3G y la cual dispone de una arquitectura propia, un aspecto importante acerca de este es el hecho de que su interfaz radioeléctrica se basa en OFDMA, el cual estudiamos en el Capítulo 1, para enlace descendente (DL) y SC-FDMA para el enlace ascendente (UL). En el caso de LTE, al igual que para el caso de la tecnología 5G, esta cuenta con una gran variedad de modelos de propagación que caracterizan el comportamiento de las ondas de radio, en el caso de LTE los modelos de propagación están clasificados para cada una de las distintas bandas de frecuencia en las que opera LTE. En la Tabla 2.3 podemos observar las frecuencias en las que operan las telefonías celulares más usadas en México

Tabla 2.3 Frecuencia de operación LTE de las principales compañías telefónicas de México

<b>Operador</b>	<b>Frecuencia (MHz)</b>	<b>Banda</b>	<b>Frecuencia de Subida (MHz)</b>	<b>Frecuencia de Bajada (MHz)</b>
AT&T	1700	4	1710-1785	1805-1880
Telcel	1700	4	1710-1785	1805-1880
Movistar	1900	2	1850-1910	1930-1990

Hay gran diversidad de modelos de propagación que pueden ser implementados, en el caso de nuestro país, el modelo recomendado para cada una de las bandas de frecuencia es:

- Banda 1900 MHz – Modelo COST 231 Hata.

Entre otros modelos de propagación podemos encontrar los siguientes:

- Modelo SUI.
- Modelo Okumura.
- Modelo Okumura-Hata.
- Modelo COST 231 Hata.
- Modelo COST 231 Walfisch Ikegami.
- Modelo Ericsson 999.

Para poder tener mayor margen de comparación también se implementarán, para la comparación, los siguientes modelos:

- Modelo Ericsson 999.
- Modelo SUI, tanto su categoría A y B.

### **2.3.1 Modelo COST 231 Hata**

A este Modelo también se le conoce como COST Hata. Se trata de una extensión del Modelo de Okumura-Hata [6].

Para la implementación de este modelo se deben de cumplir con ciertas condiciones, las cuales son:

- Frecuencias entre 1500 y 2000 MHz.
- Altura del UE entre 1 y 10 m.

- Altura de la estación Base entre los 30 y los 200 m.
- Distancia del enlace de 1 a 20 Km.

Las pérdidas de trayecto están dadas por la siguiente expresión

$$PL[dB] = 46.3 + 33.9 \cdot \log f - 13.82 \cdot \log h_b - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \cdot \log h_b) \cdot \log d + C \quad (2.2)$$

Donde:

$h_b$  : Altura de la estación base.

$h_m$  : Altura del móvil.

$a(h_m)$  : Factor de corrección de altura del móvil.

Para el cual  $a(h_m)$  está definido para Zona Urbana, Rural y Suburbana como:

Zona Urbana:

$$a(h_m) = 3.2(\log(11.75 \cdot h_m))^2 - 4.97 \quad (2.3)$$

Zona Rural y Suburbana:

$$a(h_m) = 3.2(\log f - 0.7)h_m - (1.56 \cdot f - 0.8) \quad (2.4)$$

$C = 3$  dB para áreas Urbanas.

Los valores implementados para la simulación de este modelo de propagación se muestran en la Tabla 2.4 a continuación:

Tabla 2.4 Parámetros de Cost 231 Hata

Parámetros	Valores
Hb (m)	3
Hm (m)	30
Rango de Frecuencias (MHz)	1500-2000
Distancia entre Estación Base y RX (Km)	10

Estos valores se escogieron con el fin de observar las pérdidas con la frecuencia mínima de operación (1500 MHz) y con la frecuencia máxima de operación (2000 MHz) que el Modelo permitía para observar las pérdidas de trayecto.

El resultado de la simulación puede observarse en la Figura 2.4 que representa las pérdidas de trayecto, obtenidas a partir de la expresión (2.2).

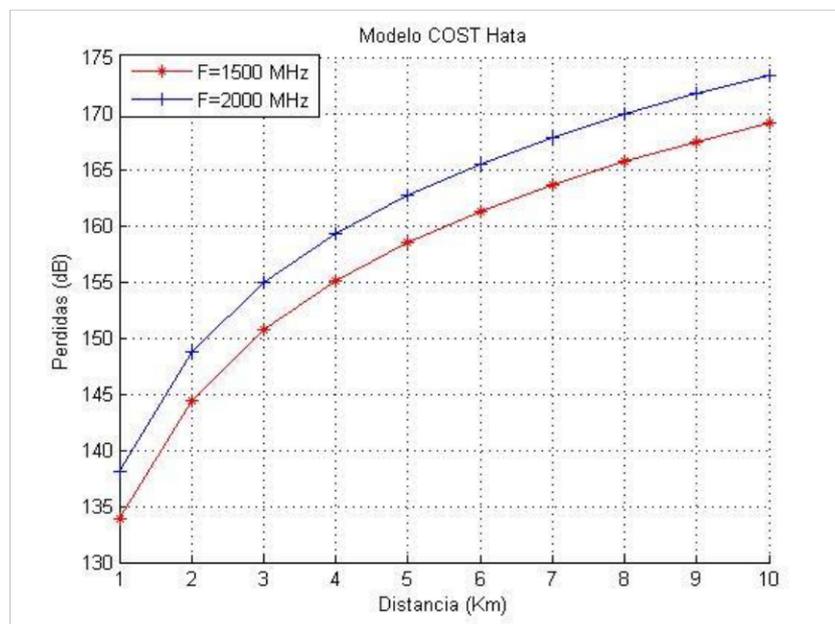


Figura 2.4 Pérdidas de Trayecto en Modelo COST Hata, en donde observamos las pérdidas de trayecto a una frecuencia de 1500MHz y 2000MHz a lo largo de una distancia de 10 Km.

### 2.3.2 Modelo Ericsson 9999

Modelo Implementado por Ericsson como una extensión del modelo Hata [7]. Este método de cálculo permite hacer ajustes en algunos parámetros en función del tipo de escenario en el que nos encontremos.

Las pérdidas de trayecto están dadas por la siguiente expresión (2.5).

$$PL[dB] = a_0 + a_1 \log d + a_2 \log h_b + a_3 \log h_b \log d - 3.2(\log 11.75)^2 + g(f) \quad (2.5)$$

Donde:

$h_b$  : Altura de la estación base.

$d$  : Distancia entre Transmisor y Receptor (Km)

Donde  $g(f)$  se define por:

$$g(f) = 44.49 \log f - 4.78(\log f)^2 \quad (2.6)$$

$a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  son constantes que dependen del tipo de escenario, sus valores por defecto son:

$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
36.2	30.2	12	0.1

Tabla 2.5 Constantes del Modelo Ericsson 9999

Los resultados obtenidos de la expresión (2.6) se pueden observar en la Figura 2.5 que representa las pérdidas de trayecto con el modelo Ericsson 9999.

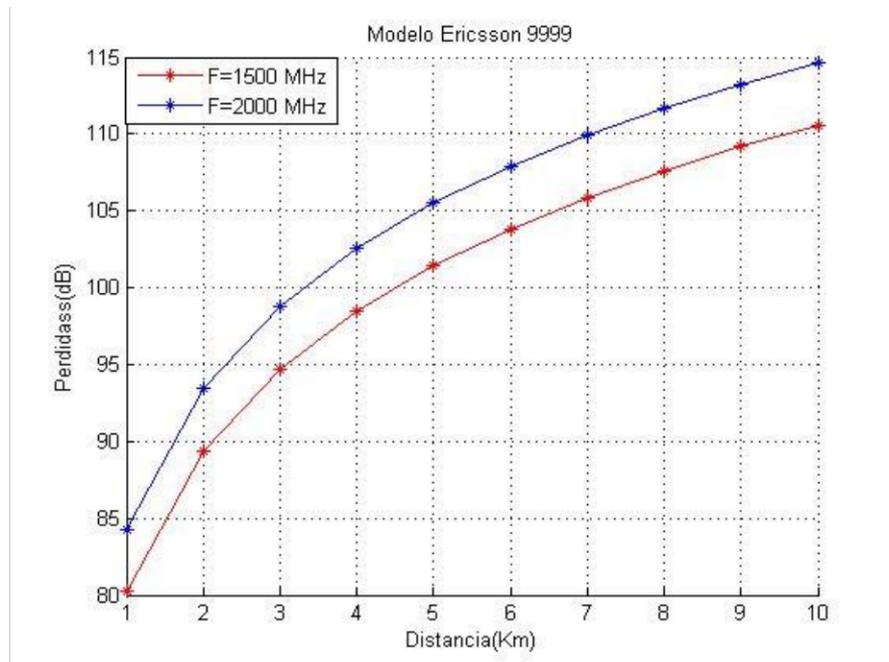


Figura 2.5 Pérdidas de Trayecto en Modelo Ericsson 9999, en donde se observan las pérdidas de trayecto a las frecuencias de 1500 MHz y 2000Mhz a lo largo de una distancia de 10Km

### 2.3.3 Modelo SUI

Este modelo fue desarrollado por el grupo 802.16 del IEEE en conjunto con la universidad de Stanford, con el objetivo de desarrollar un modelo de canal WiMAX para entornos Suburbanos [7]. Este modelo divide los escenarios de propagación en tres tipos:

1. Categoría A: terreno montañoso con niveles medios y altos de vegetación, que corresponde a condiciones de pérdida elevadas.
2. Categoría B: terreno montañoso con niveles bajos de vegetación, o zonas llanas con niveles medios y altos de vegetación, o zonas llanas con niveles medios y altos de vegetación. Pérdidas de nivel medio.
3. Categoría C: terreno llano con densidad de vegetación baja. Pérdidas bajas.

En todos los escenarios suelen darse normalmente las condiciones siguientes:

- Frecuencias superiores a los 1900 MHz
- Tamaño de las celdas inferior a 10 Km
- Altura de la antena del receptor entre 2 y 10 m
- Altura de la antena de la estación base entre 15 y 40 m
- Requisito de porcentaje de cobertura elevado (80% - 90%)

La expresión que determina las pérdidas de propagación se puede ver a continuación.

$$PL[dB] = L_0 + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + s \quad (2.7)$$

Donde:

$L_0$  : Pérdida en espacio libre a la distancia de referencia  $d_0$ .

$d$  : Distancia entre el transmisor y el receptor.

En donde el factor de corrección de frecuencia  $X_f$  se define como:

$$X_f = 6 \log\left(\frac{f}{2000}\right) \quad (2.8)$$

$X_h$  : Factor de corrección de altura de la estación base.

$$X_h = -10.8 \log\left(\frac{h_b}{2000}\right) \quad (\text{Categorías A y B}) \quad (2.9)$$

$$X_h = -20 \log\left(\frac{h_b}{2000}\right) \quad (\text{Categoría C}) \quad (2.10)$$

Ensombrecimiento:

$$s = 0.65(\log f)^2 - 1.3 \log f + \alpha \quad (2.11)$$

$$\alpha = 5.2dB \text{ (Categoría A y B)} \quad (2.12)$$

$$\alpha = 6.6dB \text{ (Categoría C)} \quad (2.13)$$

Exponente de pérdidas:

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (2.14)$$

Tabla 2.6 Parámetros a, b y c categorías A, B y C

Parámetros	Categoría A	Categoría B	Categoría C
A	4.6	4	3.6
b(1/m)	0.0075	0.0065	0.005
c(m)	12.6	17.1	20

Los resultados de la simulación se pueden observar en la Figura 2.6 que representa las pérdidas de trayecto con el modelo SUI.

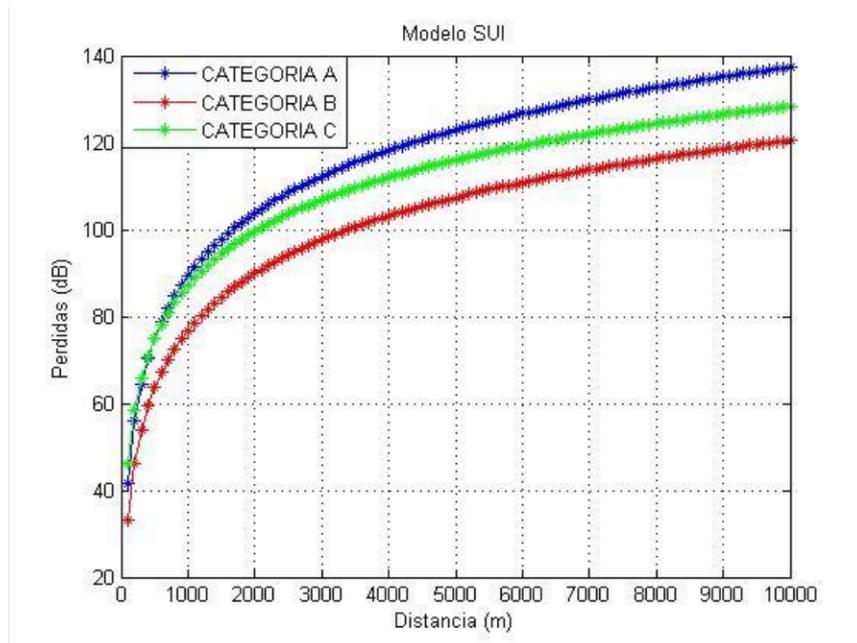


Figura 2.6 Pérdidas de Trayecto en Modelo SUI, en donde se observan las pérdidas de trayecto en sus 3 distintas categorías a lo largo de una distancia de 10000 metros.

## 2.4 Modelos de Propagación para 5G

El hecho de contar con una nueva tecnología como lo es 5G hace necesario la definición de nuevos modelos de canal que cubran aspectos de la propagación a estas frecuencias, en este caso se abordaran 5 de estas propuestas de modelos de propagación que El hecho de contar con una nueva tecnología como lo es 5G hace necesario la definición de nuevos modelos de canal que cubran aspectos de la propagación a estas frecuencias, en este caso se abordaran 5 de estas propuestas de modelos de propagación que buscan caracterizar el comportamiento de las pérdidas de trayecto implementando este rango de frecuencias.

### 2.4.1 Modelo Floating Intercept

El Modelo Floating Intercept (FI) fue utilizado anteriormente en el desarrollo de los Modelos de Canal como lo son el WINNER II y el 3GPP (3rd Generation Patnership Project) [15].

Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA

A grandes rasgos se trata de un modelo el cual no cuenta con una referencia física, solamente busca la mejor línea que se ajuste a los datos medidos utilizando un método de regresión por mínimos cuadrados. Este modelo solamente es válido sobre las distancias específicas para las cuales fueron echo las mediciones. El modelo que describe las pérdidas de trayecto se observa a continuación.

$$PL[dB] = \alpha + 10\beta \log_{10}(d) + X \quad (2.15)$$

Donde:

$d$  : Distancia entre Transmisor y Receptor.

$\beta$  : Coeficiente característico de dependencia entre la pérdida de propagación y la distancia.

$\alpha$  : Intersección flotante en dB.

$X$  : es el desvanecimiento en dB

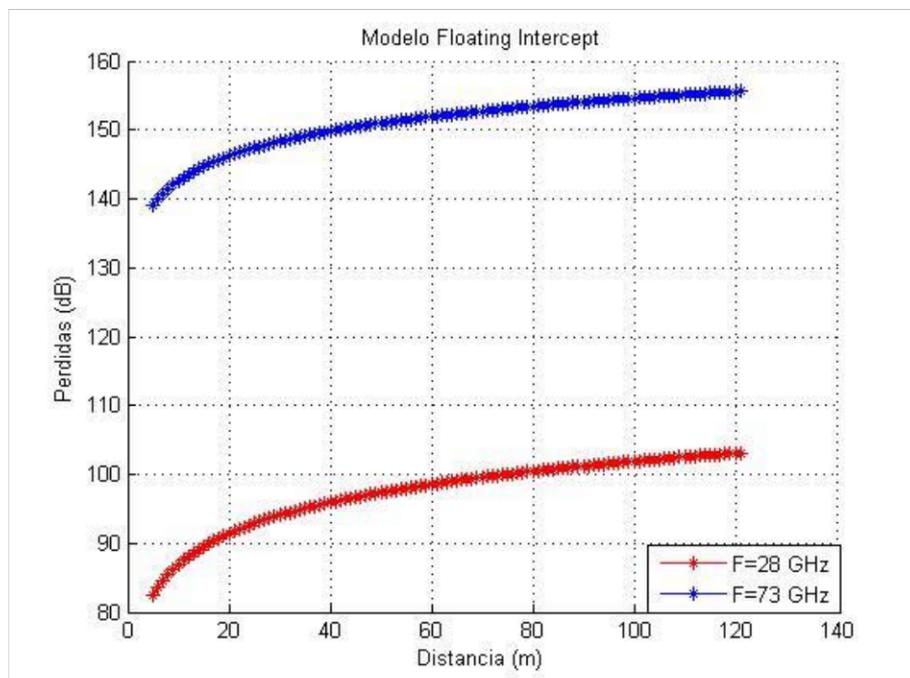


Figura 2.7 Pérdidas de Camino en Floating Intercept con una frecuencia de 28 y 73 GHz a lo largo de una distancia de 140 metros.

De la Figura 2.7 se puede observar que las pérdidas no cambian demasiado al aumentar la distancia, además se puede notar el cambio abrupto de pérdidas al aumentar la frecuencia, ya que hay muchas más pérdidas a 73 GHz en comparación con 28GHz.

#### 2.4.2 Modelo Close-in free space reference

El modelo Close-in Free (CI) es un modelo sencillo el cual solo hace uso de un parámetro para describir las pérdidas de trayecto sobre todas las frecuencias y la distancia. Su funcionamiento es sencillo, se basa en principios físicos fundamentales como el establecimiento de un punto de referencia y este puede ser empleado para enlaces que cuentan con visión directa o a su vez para los que no cuentan con esta [16].

En las ondas milimétricas las pérdidas en frecuencia ocurren en los primeros metros de propagación después del Transmisor (Tx), lo cual motiva a la utilización de una distancia de referencia  $d_0$  de 1m, el uso de la distancia de referencia permite una comparación más sencilla para diferentes campañas de medidas llevadas a cabo por distintos investigadores en condiciones, frecuencias y casos diferentes.

Su expresión es la siguiente:

$$PL^{CL}(f, d)[dB] = FSPL(f, 1m)[dB] + 10n \log_{10} d + X \quad (2.16)$$

En donde:

$n$  : Parámetro de modelo único, con  $10n$  que describe la pérdida de trayectoria en términos de décadas de distancia a partir de 1m.

$d$  : es la distancia entre TX y RX.

$X$  : Desvanecimiento por ensombrecimiento.

$FSPL(f, 1m)[dB]$ : es la expresión de espacio libre para una  $d = 1$  m.

$$FSPL(f, 1m)[dB] = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi f}{c} \right) \quad (2.17)$$

Debido al término de espacio libre, el modelo cuenta con una dependencia intrínseca con la frecuencia. Las pérdidas en el primer metro son capturadas por el término de espacio libre y se trata así de forma separada del PLE, que caracteriza las pérdidas más allá de 1 m.

En la Figura 2.8 se puede notar que las pérdidas aumentan exponencialmente al aumentar la distancia, sin embargo, al variar la frecuencia de 30 a 72 GHz las gráficas no se alejan demasiado, permaneciendo la diferencia entre ellas de 10 dB.

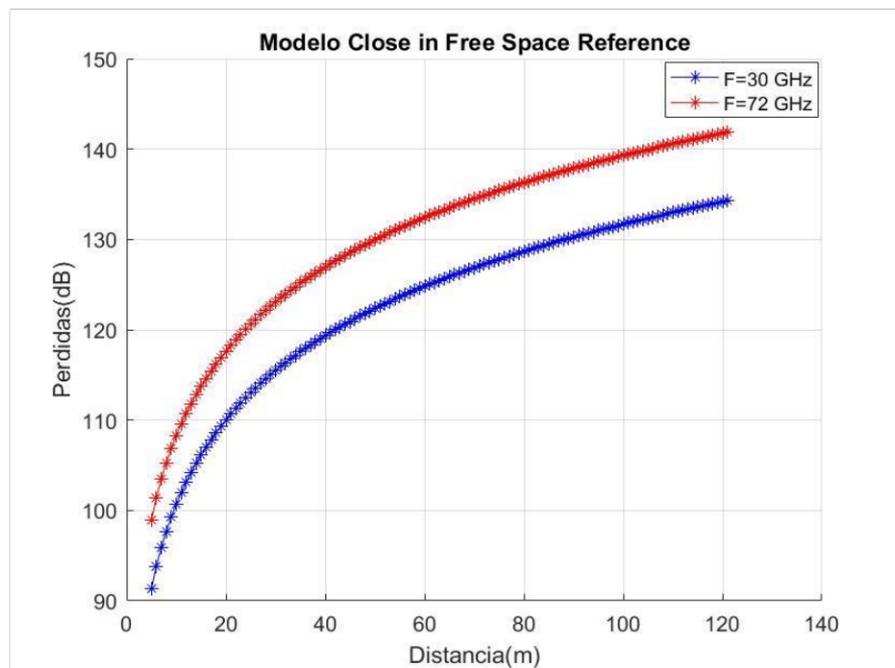


Figura 2.8 Perdidas de Camino en Close in Free en donde se observan las pérdidas de trayectoria en las frecuencias 30 y 72 GHz a lo largo de 140 metros.

### 2.4.3 Modelo Alpha-Beta-Gamm

El modelo Alpha- Beta- Gamma (ABG), se trata de una evolución del modelo Floating Intercept, pero con la diferencia de que extiende el concepto de este para múltiples frecuencias, esto gracias a la adición de un nuevo parámetro  $\gamma$  a los parámetros que ya consideraba,  $\alpha$  y  $\beta$  ya definidos por el modelo Floating Intercept [16].

Este modelo se caracteriza por subestimar las pérdidas de propagación en lugares relativamente cercanos al Transmisor (Tx) y sobreestima las pérdidas de propagación en posiciones lejanas al Tx, con implicaciones en frecuencias milimétricas, esto debido a que estima señales más débiles que deberían alcanzar distancias mayores.

$$PL^{ABG}(f, d)[dB] = 10\alpha \log_{10}\left(\frac{d}{1m}\right) + \beta + 10\gamma \log_{10}\left(\frac{f}{1GHz}\right) + X \quad (2.18)$$

Donde:

$PL^{ABG}$ : es la pérdida de trayecto en dB como función de la distancia  $d$  entre Transmisor y Receptor.

$\alpha$ : es un coeficiente característico de dependencia entre la pérdida de propagación y la distancia

$\beta$ : es la intersección flotante en dB.

$\gamma$ : es un coeficiente característico de dependencia entre la pérdida de propagación y la frecuencia.

$X$ : Factor de ensombrecimiento.

A continuación, podemos observar en la Figura 2.9 las pérdidas de trayecto del Modelo Alpha-Beta-Gamma a las frecuencias de 30 GHz y 72 GHz, a lo largo de 120 metros.

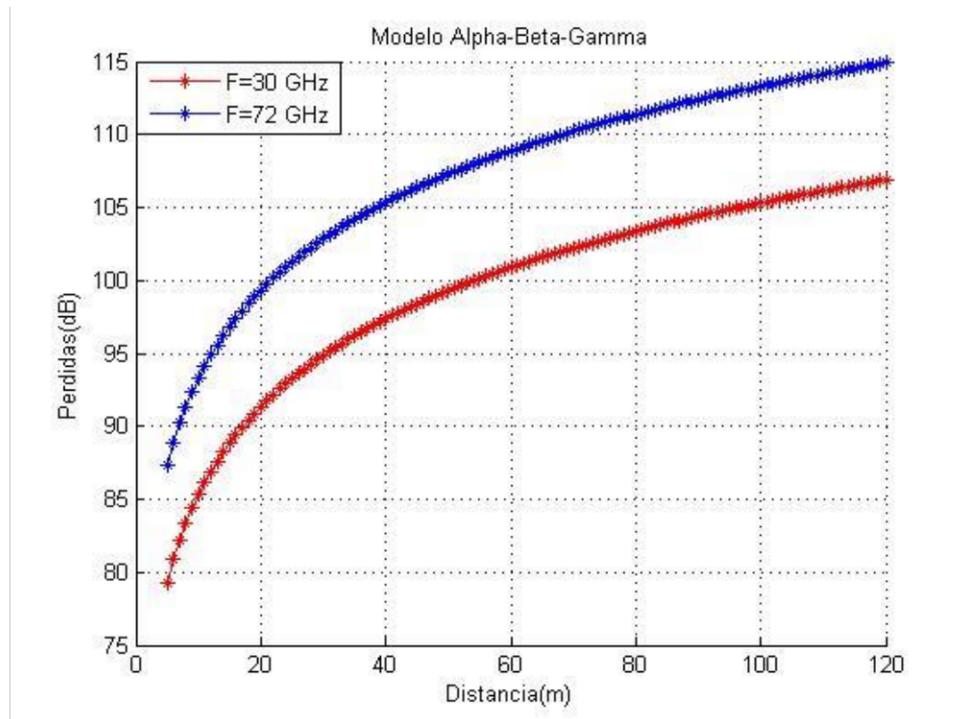


Figura 2.9 Pérdidas de Camino en Alpha-Beta-Gamma a una frecuencia de 30 y 72 GHz a lo largo de una distancia de 120 metros.

En la Figura 2.9 podemos observar las pérdidas de trayecto para dos distintas frecuencias de operación como lo son 30 GHz y 72 GHz a lo largo de una distancia entre transmisor y receptor de 120 metros. Como puede observarse, las pérdidas de trayecto dependen directamente de la frecuencia de operación y la distancia en la que se propaga la onda de radiofrecuencia. Por lo que las pérdidas de trayecto a la frecuencia de 72 GHz son mayores que las pérdidas a 30 GHz y estas pérdidas van en incremento conforme la distancia va en aumento.

#### 2.4.4 Modelo Close-in free space reference frequency dependant

El modelo Close-in Free Space Reference Frequency Dependant tiene como objetivo extender el modelo Close-in Free mediante la introducción de un término dependiente de la frecuencia, que permite su aplicación a múltiples frecuencias [15]. La expresión que describe las pérdidas de trayecto se observa a continuación:

$$PL^{CIF}(f, d)[dB] = FSPL(f, 1m)[dB] + 10n \left( 1 + b \left( \frac{f - f_0}{f_0} \right) \right) \log_{10}(d) + X \quad (2.19)$$

Donde:

$FSPL(f, 1m)[dB]$ : denota las pérdidas de trayecto de espacio libre en dB a una distancia de separación Transmisor-Receptor de 1 metro a la frecuencia portadora

$n$ : Exponente de pérdidas

$b$ : es el parámetro que muestra la dependencia entre las pérdidas y las frecuencias

$f$ : Frecuencia de operación.

$f_0$ : es la frecuencia de referencia usada en las medidas calculada.

$X$ : Desvanecimiento por ensombrecimiento

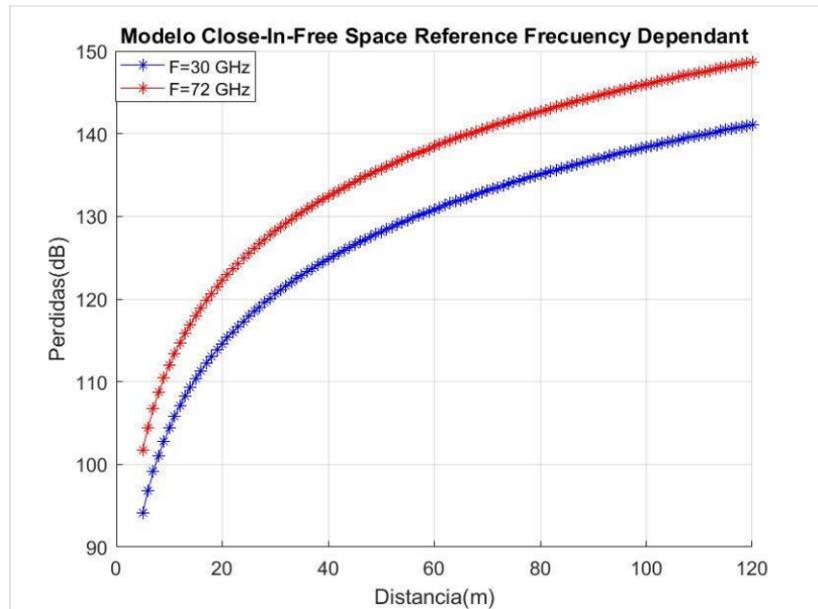


Figura 2.10 Perdidas de Camino en Close-in Free Frequency Dependant

De acuerdo al trabajo desarrollado y el estudio de estos modelos se ha llegado a algunas de las principales conclusiones referentes al uso de estos modelos experimentales.

- Los modelos CI y CIF resultan superiores a los modelos FI y ABG tanto en estabilidad como en precisión cuando se emplea el modelo para predecir las pérdidas a distancias y frecuencias diferentes de las empleadas para determinar los parámetros del modelo a partir de los datos recopilados en las campañas de mediciones.
- De entre los modelos analizados, se ha comprobado que el modelo CI se muestra más adecuado para exteriores debido a su precisión, simplicidad y a un mejor rendimiento, debido al hecho de que las simulaciones muestran poca dependencia a la frecuencia en entornos exteriores más allá del primer metro de propagación, quedando expuesta la dependencia con la frecuencia por debajo de la distancia  $d_0$  referencia en el término relativo al modelo de espacio libre. Por el contrario, el modelo CIF resulta más adecuado para entornos interiores, donde resulta relevante la dependencia con la frecuencia más allá de la distancia de referencia.
- Por último, hay que destacar que los modelos CI y CIF resultan similares a los modelos 3GPP existentes (FI y ABG), si simplemente se sustituye la constante  $\beta$  de los modelos 3GPP por el término de pérdidas en espacio libre en función de la frecuencia y para 1 m de distancia de los modelos referenciados en (2.15), (2.16),(2.18), y (2.19).

## 2.5 Modelos de Propagación 5G a frecuencia mínima de operación 30 GHz

A continuación, se hace una comparación entre los distintos modelos de Propagación abordados anteriormente, con el fin de poder deducir cuál de ellos nos es de mayor utilidad para la implementación de ondas Milimétricas. Lo que buscamos en los Modelos de Propagación es el modelo que nos permita una mejor caracterización acerca de cómo se propagan las ondas milimétricas en un ambiente definido.

En la Figura 2.11 se observa la comparación de los 4 modelos propuestos para 5G con una frecuencia de portadora de 30 GHz, la cual es la frecuencia mínima en el uso de ondas milimétricas a lo largo de una distancia entre Transmisor y Receptor de 120 metros.

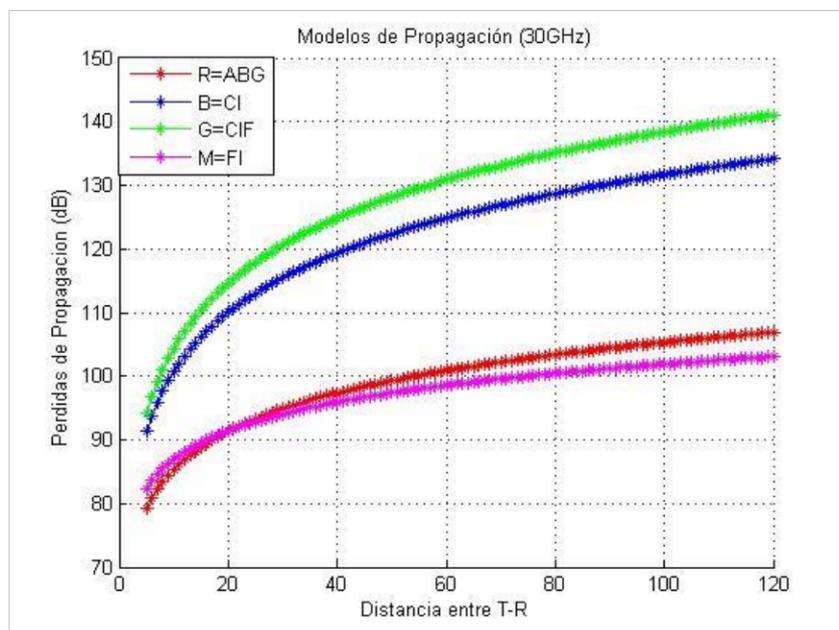


Figura 2.11 Comparación de los distintos Modelos de Propagación a una frecuencia de 30GHz a lo largo de una distancia de 120 metros.

Como se observa de la Figura 2.11, el modelo que presenta mayores pérdidas a lo largo del trayecto de la onda de radio frecuencia es el modelo Close In Free Space Reference Frequency Dependat

Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA (CIF), mientras que el modelo que menos pérdidas presenta es el modelo Floating Intercept, por lo que es el modelo más adecuado para estas frecuencias.

## 2.6 Modelos de Propagación 5G a frecuencia máxima de operación 72 GHz

En la Figura 2.12 podemos observar la comparación de los 4 modelos de propagación propuestos para 5G con la diferencia de que su frecuencia de operación es de 72 GHz, frecuencia límite para la operación de los modelos de propagación a lo largo de una distancia entre Transmisor y Receptor de 120 metros.

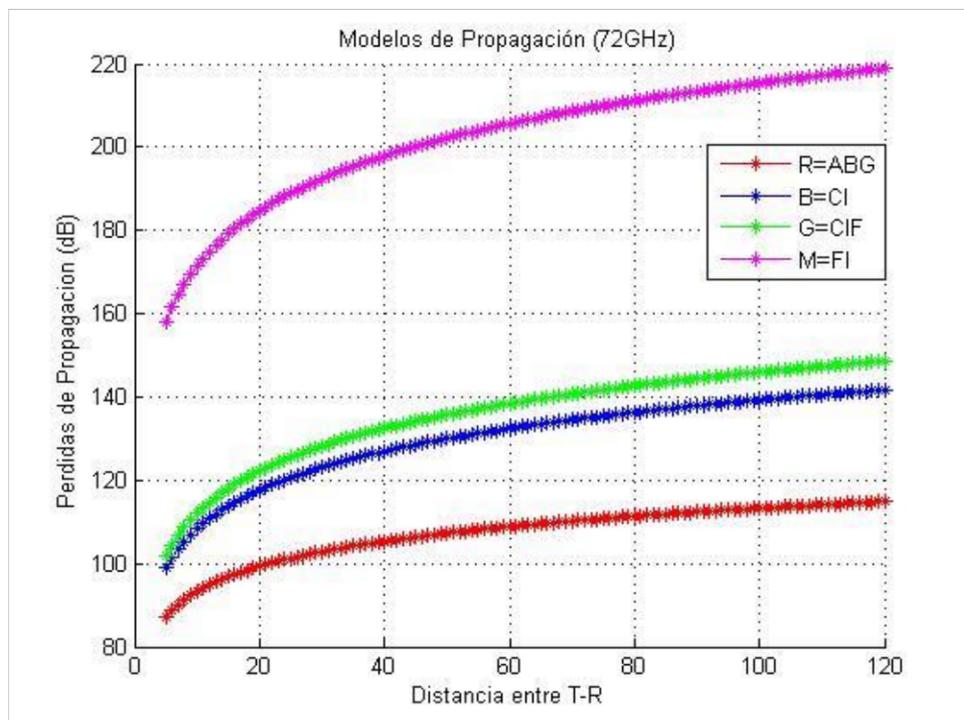


Figura 2.12 Comparación de los distintos Modelos de Propagación en frecuencia de 72GHz a lo largo de una distancia de 120 metros.

Como se observa en la Figura 2.12, al haber un aumento en la frecuencia portadora, las pérdidas de trayecto aumentan en cada uno de los modelos de propagación, en el caso anterior (con 30 GHz) el modelo que presentaba más pérdidas era el Close In Free Space Reference Frequency Dependat

Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA y de menores pérdidas el Floating Intercept. Ahora en el caso de una frecuencia de 72 GHz las cosas son distintas, el modelo que presenta más pérdidas es el Modelo Floating Intercept y el de menores pérdidas el Alpha-Beta-Gamma.

Es importante notar que el modelo que más se mantiene constante en cuanto a pérdidas es el modelo ABG, esto debido a que como modelo de propagación considera para su estudio toma en cuenta en su expresión matemática que caracteriza las pérdidas, mientras que el modelo Floating Intercept, a pesar de presentar pocas pérdidas a una frecuencia de 30 GHz, al incrementar esta, se dispara de forma considerable sus valores de pérdidas. Esto relacionado directamente a que es el modelo que menos factores considera a la hora de caracterizar las pérdidas de trayecto.

En cuanto a los dos modelos Close in Free, se puede notar que las pérdidas presentadas tanto en 30 GHz y 72 GHz no tienen gran variación una respecto a la otra, lo que nos permite ver que son modelos que nos permiten una caracterización también adecuada para el estudio de ondas milimétricas.

## **2.7 Comparación de los Modelos de Propagación en LTE y 5G**

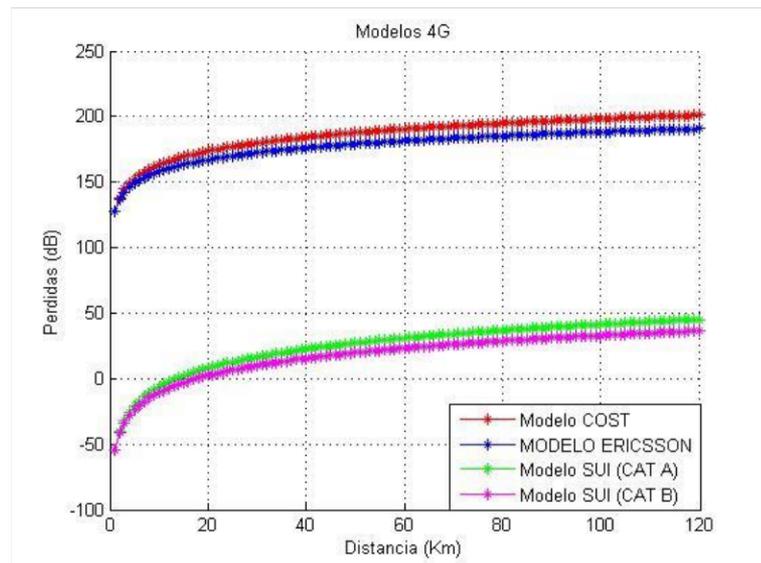
Como fue abordado al comienzo de este capítulo un Modelo de Propagación es una expresión matemática que nos permite caracterizar como se propagan las ondas de radiofrecuencia en función de algún parámetro, tal como lo es la frecuencia, distancia o algún otro factor. Esto con la finalidad de conocer las pérdidas que la onda de radio frecuencia presenta a lo largo que se va propagando en un ambiente determinado, la caracterización de las pérdidas de trayecto está íntimamente relacionada a los factores que cada modelo considera para describirlas, he de ahí que cada uno de los modelos presenten variaciones en cuanto a cómo caracteriza las pérdidas para cada uno de los modelos.

En este Capítulo procederemos a hacer una comparación entre los modelos de propagación en LTE (estándar de comunicación para redes 4G) y los Modelos de Propagación propuestos para la futura red 5G.

## 2.8 Modelos LTE VS ondas milimétricas, una alternativa para 5G

Para observar las diferencias entre los modelos implementados en LTE y los modelos propuestos para ondas milimétricas se procedió a graficar en una misma grafica los modelos de LTE y en otra grafica distinta los modelos propuestos para ondas milimétricas.

En la figura 2.10 primeramente podemos ver la comparación entre los modelos implementados en LTE, que fueron vistos anteriormente en este capítulo, en la cual podemos observar las pérdidas de trayecto a lo largo de una distancia entre Tx y Rx de 120 Km y de igual forma podemos observar en una gráfica distinta los modelos propuestos para ondas milimétricas, la cual representa las pérdidas de trayecto a lo largo de una distancia entre Tx y Rx de 120 metros.



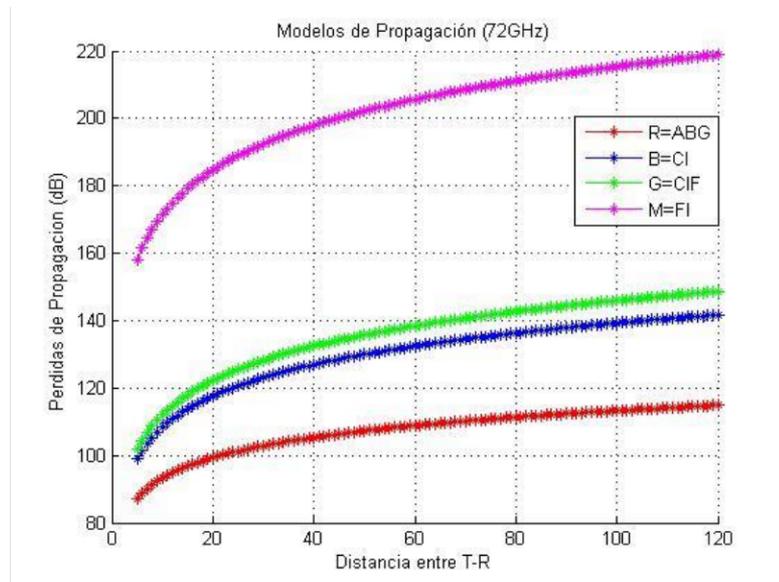


Figura 2.13 Perdidas de Trayecto en los Modelos de LTE y Ondas Milimétricas

Los modelos para ambas tecnologías representan las pérdidas que la onda de radio frecuencias sufre a lo largo de la distancia en la que se propaga, en el caso de los modelos de LTE estos solo caracterizan las pérdidas para frecuencias que rondan los Mega Hertz y los modelos propuestos para ondas milimétricas están específicamente diseñados para caracterizar las pérdidas a frecuencias entre los 30 y 72 GHz.

Una diferencia notoria al poner en comparación los modelos utilizados para LTE y los propuestos para ondas milimétricas es el hecho de la distancia que estos modelos abarcan para la caracterización de pérdidas de trayecto. Los modelos de LTE permiten caracterizar pérdidas a distancias de separación entre transmisor y receptor de Kilómetros, especificando la distancia en kilómetros por cada modelo, esto debido a que las frecuencias a las que opera LTE permiten un mayor rango de cobertura sin sufrir demasiadas pérdidas que afecten a la comunicación entre transmisor y receptor, caso diferente a la hora de observar las pérdidas en los modelos propuestos para ondas milimétricas. Estos modelos solo permiten la caracterización de pérdidas de trayecto

Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA para distancias entre transmisor y receptor en metros, esto debido que a diferencia de LTE las frecuencias a las que operaría 5G, aún sigue en estudio la implementación de esta tecnología, tienen un rango de cobertura considerablemente menor, hablamos de que la distancia en las que las ondas milimétricas operarían sin sufrir grandes pérdidas es de distancias de metros, esto principalmente se debe al hecho de la alta frecuencia de operación, al ser frecuencias en Giga Hertz ocasiona que la longitud de onda sea de milímetros, como su nombre lo indica “ondas milimétricas”, lo cual las hace muy susceptibles a sufrir pérdidas .

## **CAPÍTULO 3 Parámetros de operación en sistemas celulares 5G**

### **3.1 Relación Señal a Ruido más Interferencia SINR**

La relación señal a ruido más interferencia, como ya se ha mencionado es un parámetro fundamental para la caracterización del desempeño de un enlace inalámbrico. La potencia de la señal recibida depende de la potencia transmitida y de las pérdidas en el trayecto entre transmisor y receptor; se define como ruido a cualquier señal no deseada, que aparece superpuesta a las señales de nuestro sistema; aunque en algunos casos el factor relevante es el aporte de otros usuarios que se encuentren en el mismo rango de frecuencias, en este caso no se habla de ruido, sino de interferencia.

Para observar el efecto de la interferencia sobre nuestra señal de interés se realizó la simulación de un enlace de bajada, en un escenario de 19 celdas, donde cada celda se divide en 3 antenas direccionales para cubrir el sector de  $120^\circ$  cada una, para la simulación suponemos un radio de celda normalizado y 10 usuarios en la celda principal ubicados cada 10% del radio de la celda.

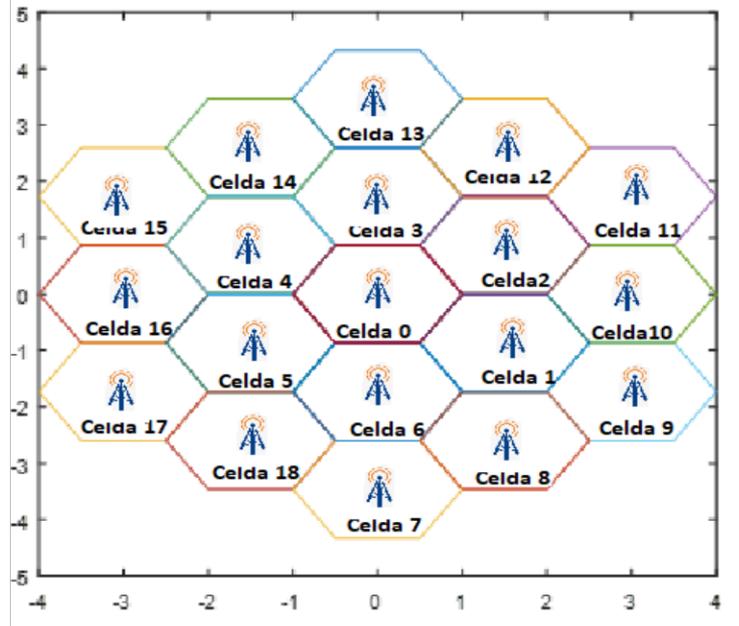


Figura 3.1 Entorno de simulación 19 celdas

La SIR para los usuarios ubicados en la celda de interés (Celda 0 en Figura 3.1) viene dada por la expresión (3.1):

$$SIR_i = \frac{PL_{k,i}}{I_i + N} \quad (3.1)$$

Donde:

$P$  es la potencia transmitida

$L_{k,i}$  es la ganancia de enlace entre la estación base  $k$  y el usuario  $i$  se modela matemáticamente con una variable aleatoria log-normal para desvanecimientos lentos

$I_i$  es la interferencia recibida

$N$  el ruido de fondo.

Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA  
 Para la simulación no se considera el ruido de fondo, ya que las señales de interferencia dominan sobre el ruido. Si se debe tener en cuenta el ruido, que suele ser AWGN (ruido gaussiano), se puede estudiar el SINR, dando como resultado que la interferencia causada por las 18 celdas externas se modela como se muestra en la expresión (3.2):

$$SIR_i = \frac{Z_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^n Z_j} \quad (3.2)$$

Donde  $i$  es la celda donde se sitúa el usuario de interés y  $n$  es el número total de celdas que están interfiriendo, en este caso son las 18 celdas alrededor de la celda 0 (Figura 3.1) y  $Z$  denota la variable aleatoria “Suzuki” conformada por la suma de una variable aleatoria log-normal y una Rayleigh (utilizada para caracterizar los desvanecimientos rápidos).

Para el cálculo de la SIR de cada usuario, primero se obtuvieron las distancias y ángulos de cada una de las estaciones bases (ubicadas al centro de cada una de las 19 celdas, Figura 3.1) hacia cada uno de los usuarios ubicados en la celda 0.

La figura 3.2 muestra los resultados de la simulación, se puede observar que la SIR va disminuyendo conforme aumenta la distancia, es decir que la potencia de la señal es menor en comparación con la interferencia.

Una vez obtenidos los ángulos, se genera una variable aleatoria lognormal ( $\delta$ ) con  $\sigma=8$  y media “ $m$ ”, denotado por la expresión (3.3):

$$m = 10 \log(d^{-\mu} G(\theta)) \quad (3.3)$$

Donde:

$\mu$  = Exponente de pérdidas por trayectoria

$d$  =Distancia calculada entre en usuario y estación base

$G(\theta)$  = Ganancia de la antena

La ganancia de la antena fue obtenida a partir de la expresión (3.4):

$$G(\phi_{l,n}) = \begin{cases} 1 - \frac{(1-q)}{\left(\frac{\pi}{3}\right)^2} \phi_{l,n}^2, & \text{si } \phi_{l,n} \leq \sqrt{\frac{1-p}{1-q}} \frac{\pi}{3} \\ p & , \text{si } \phi_{l,n} > \sqrt{\frac{1-p}{1-q}} \frac{\pi}{3} \end{cases} \quad (3.4)$$

Donde:

$q$  representa el nivel de ganancia de la antena a  $60^\circ$  de la dirección de máxima ganancia y  $p$

representa el nivel medio de ganancia normalizado.

A partir de la expresión (3.4) se obtuvo la gráfica que representa la ganancia de la antena, Figura

3.2.

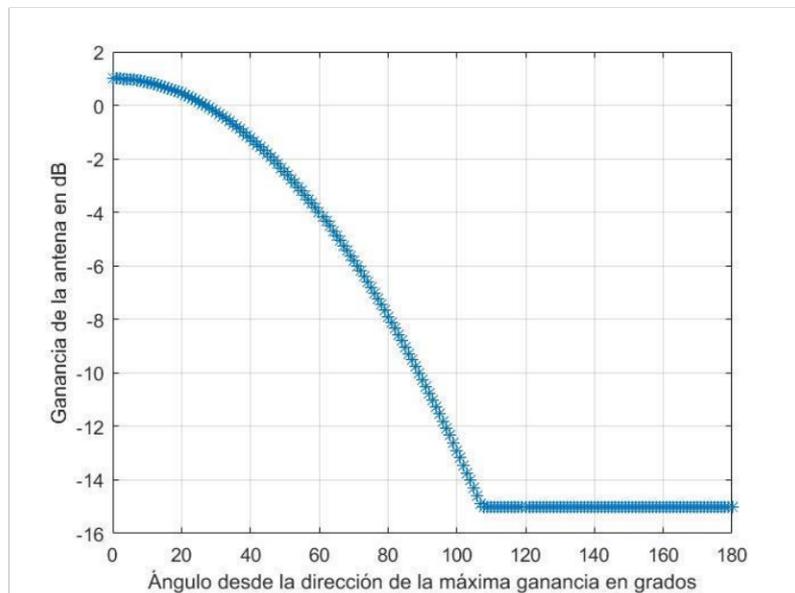


Figura 3.2 Ganancia de la Antena

Haciendo uso de la expresión (3.5) se realiza el cálculo de  $\delta$  :

$$\delta = \sigma x + m \quad (3.5)$$

Donde:

$x$  = es una variable con función de densidad de probabilidad gaussiana.

Una vez generada, ahora calculamos la variable aleatoria Log-normal con la expresión (3.6)

$$L_{k,i} = 10^{\frac{\delta_{k,i}}{10}} \quad (3.6)$$

Para obtener la variable aleatoria Rayleigh se hizo uso de la siguiente expresión:

$$R = \sqrt{X_1^2 + X_2^2} \quad (3.7)$$

Donde  $X_1$  y  $X_2$  son variables aleatorias normales.

El modelo Suzuki combina estas dos distribuciones (Rayleigh y Lognormal) para describir desvanecimientos rápidos y lentos. A partir de (3.2) se obtiene la Figura 3.3 que muestra la SIR para un sistema de 10 usuarios.

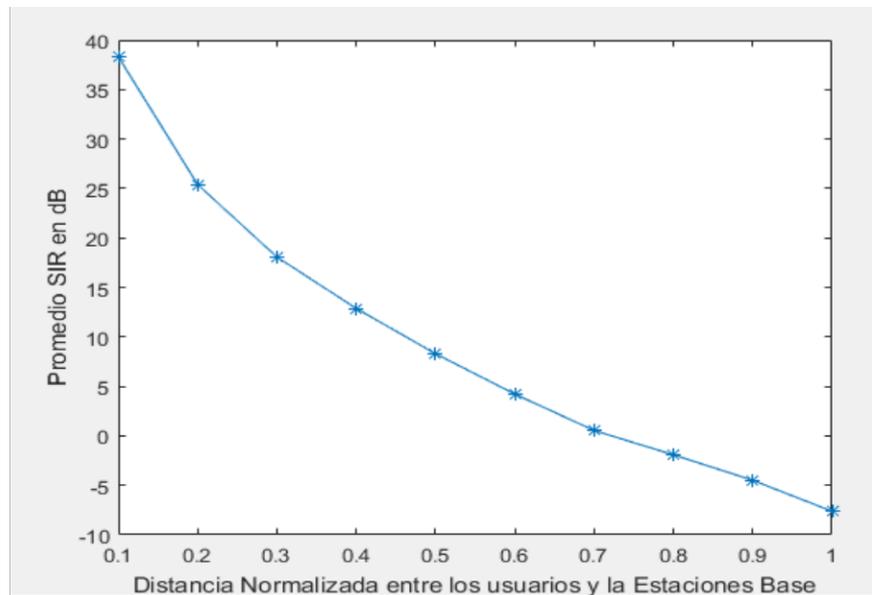


Figura 3.3 Gráfica SINR vs Distancia a los usuarios.

### 3.1.1 SIR con OFDMA

Se propuso un nuevo escenario el cual consta de 7 celdas, con un radio de 120 m., este radio se determinó tomando en cuenta los resultados obtenidos de los modelos de propagación vistos en el Capítulo 2, esto debido a que se tiene que para los modelos de propagación propuestos para 5G las pérdidas a distancias mayores de 120 m son considerablemente grandes. Cada celda contendrá 20 usuarios ubicados aleatoriamente como se muestra en la Figura 3.4, donde se utilizará un esquema OFDMA, para dividir nuestra portadora en subportadoras ortogonales y cada usuario dentro de la celda tendrá una frecuencia diferente.

### Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA

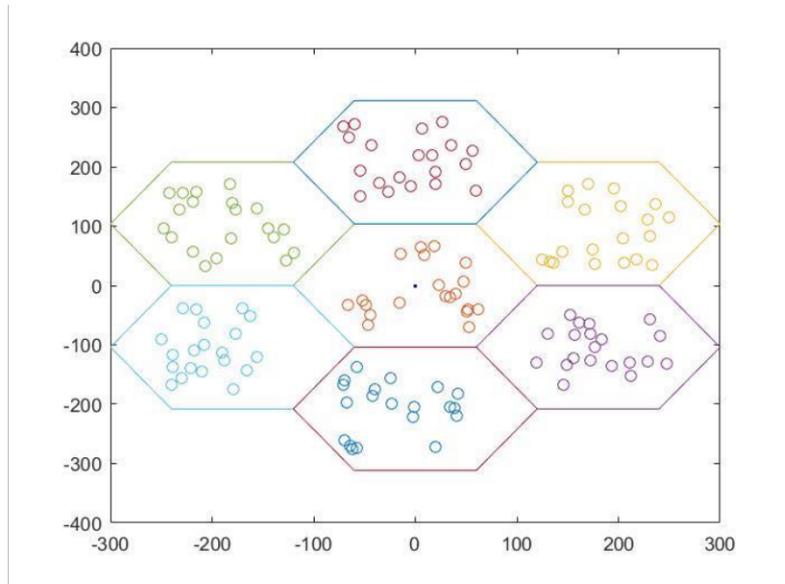


Figura 3. 4 Escenario de simulación, 20 usuarios por celda.

A continuación, se calcula la SIR respecto de la celda principal con el resto de las celdas utilizando la expresión (10)

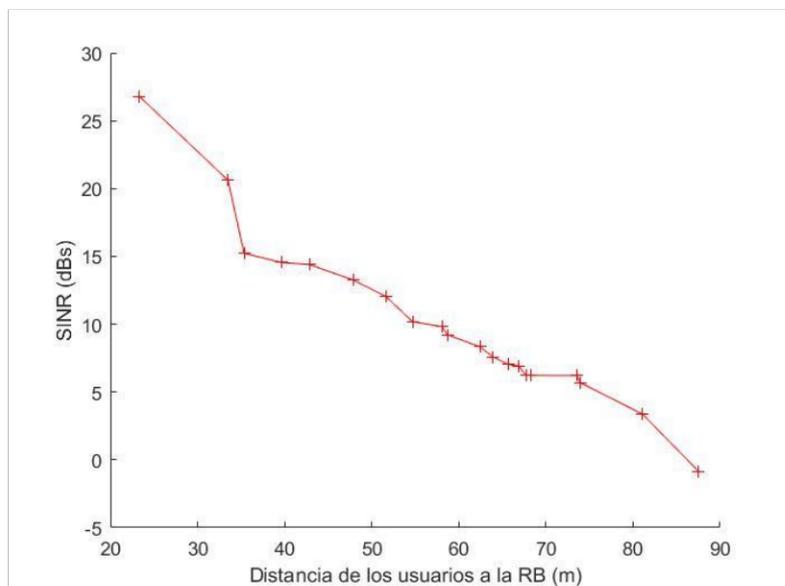


Figura 3. 5 Relación señal a Ruido del escenario de la Fig. 3.3, con OFDMA, con respecto a la distancia a la que se encuentran los usuarios de estación base.

De la figura 3.5 se observa que para usuarios cercanos a la estación base tenemos una SIR mayor con respecto a los usuarios más alejados, se observa que a distancias mayores a 80 m la potencia de la señal comienza a ser menor que las interferencias, lo que hace que se haga más difícil la comunicación.

### **3.1.2 SIR con NOMA**

NOMA a diferencia de los métodos de acceso múltiple ortogonal (por sus siglas en inglés OMA) permite compartir los mismos recursos de frecuencia al mismo tiempo.

Para realizar una comparación entre NOMA y OFDMA, tecnología utilizada en LTE, se realiza la siguiente simulación bajo los mismos parámetros (escenario de simulación 7 celdas, con un radio de 120 m), con la variación de que en OFDMA a cada usuario se le asigna una portadora, es única y ortogonal a las demás, por lo que no se repite dentro de la misma celda y no tenemos la interferencia de otros usuarios, en este esquema de acceso los usuarios pueden transmitir con todos los recursos en potencia, pero con un ancho de banda dividido, mientras que en NOMA la misma portadora puede ser usada por uno o más usuarios al mismo tiempo, lo que hace que ahora la señal de interés se vea interferida no solo por las celdas externas, sino que ahora exista interferencia intracelda por la asignación de la misma frecuencia a más de un usuario.

La Figura 3.6 muestra el caso de NOMA con la asignación de la misma portadora a 2 usuarios dentro de la misma celda.

### Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA

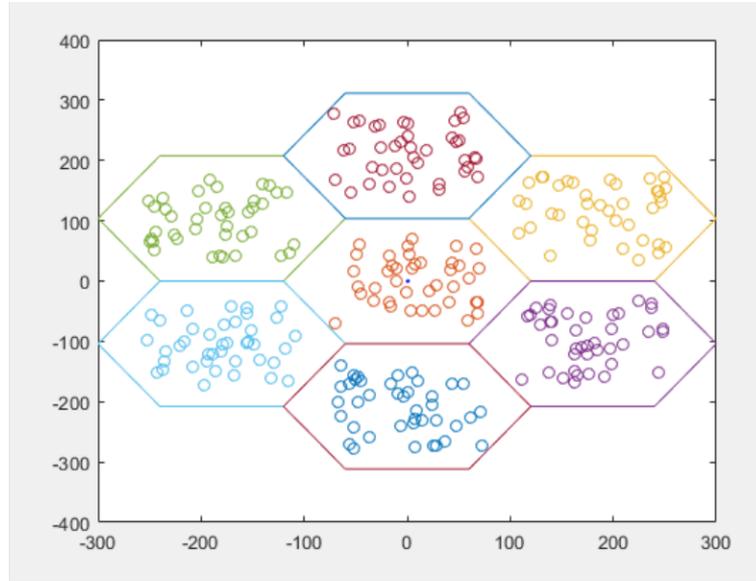


Figura 3.6 Escenario de simulación propuesto para NOMA con 2 usuarios por subportadora, con un ancho de banda de 15Mhz y un total de 40 usuarios por celda.

Se puede notar en la Figura 3.6 que a diferencia del escenario propuesto para OFDMA (Figura 3.4) el número de usuarios aumenta ya que, en NOMA, podemos compartir una subportadora, cosa que no se puede hacer con OFDMA. A continuación, en la figura 3.6 se presentan la SIR obtenida bajo los parámetros anteriores.

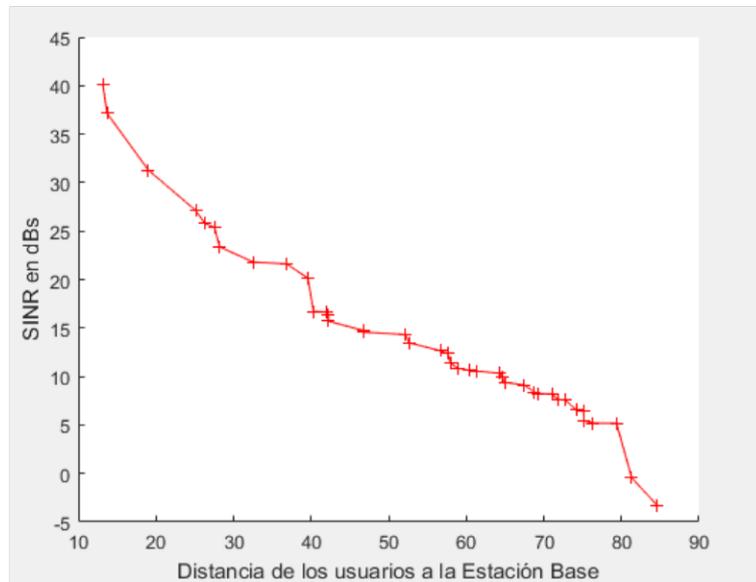


Figura 3.7 Gráfica de SINR vs Distancia para NOMA con 2 usuarios por subportadora, con un total de 20 subportadoras.

Si comparamos la Figura 3.7 con la que gráfica que se obtuvo en el escenario para OFDMA (Figura 3.4) se observa que la SIR para este caso resulta ser mayor, debido a que para esta prueba los usuarios están ubicados más cerca de la estación base, lo que hace que la SIR aumente.

Se analiza el mismo caso, pero ahora asignando 3 usuarios a la misma frecuencia por subportadora.

En la Figura 3.8 se muestra dicho escenario, se observa que la cantidad de usuarios por celda se incrementa, ya que ahora se la subportadora se comparte entre más usuarios, lo que aumenta la capacidad.

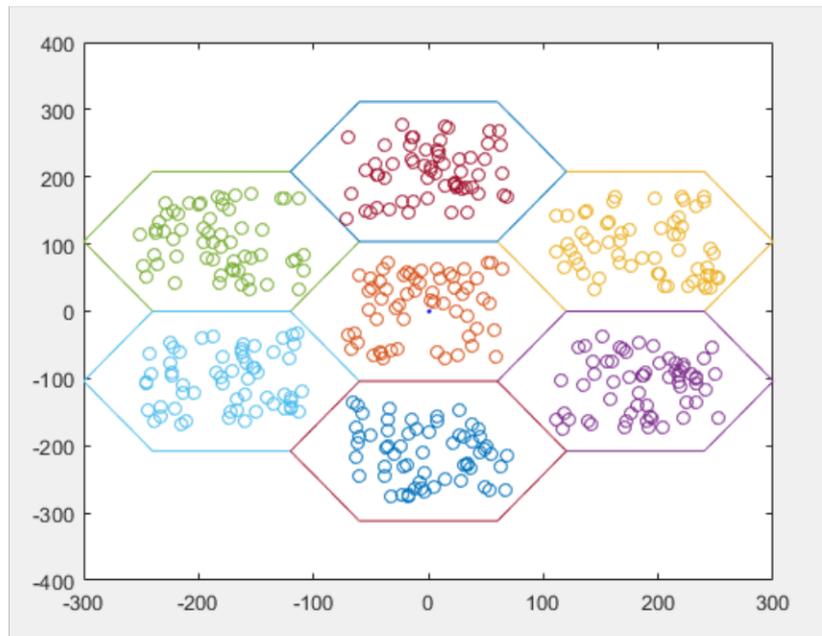


Figura 3. 8 Entorno de simulación para NOMA con 3 usuarios por subportadora, con un total de 60 usuarios por celda.

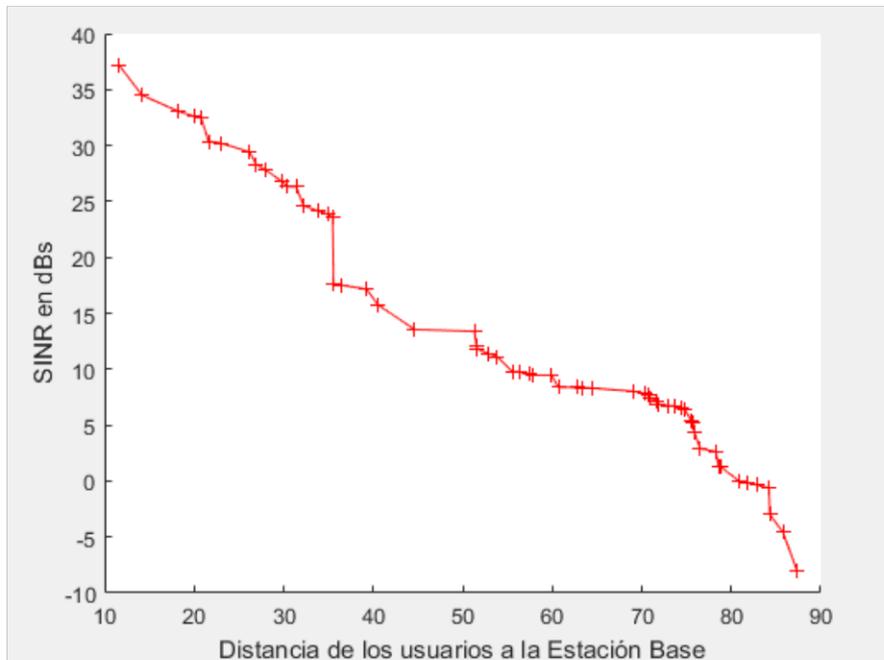


Figura 3. 9 Gráfica de SIR vs Distancia para NOMA con 3 usuarios

Si se comparan ambos escenarios (figura 3.9 y 3.7) se puede observar que la SIR para el caso donde se comparte la portadora por dos usuarios es mayor que para el escenario de tres usuarios, debido de que en este caso la interferencia experimentada es mayor.

### 3.1.3 Tasa de transferencia de datos

La tasa de transmisión de datos mide la cantidad de bits que son transferidos por segundo. Para iniciar una comparación entre OFDMA y NOMA, tomamos en cuenta el siguiente escenario de la Figura 3.10, donde se observa la diferencia entre cada una de las multiplexaciones, donde en NOMA se divide en el dominio de la potencia y en OFDMA en el dominio de la frecuencia, creando subportadoras ortogonales entre sí.

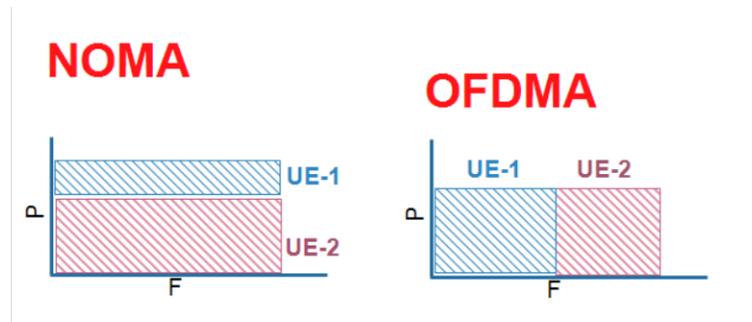


Figura 3.10 Comparación entre OFDMA y NOMA.

Para calcular la Transferencia de bit en OFDMA, el ancho de banda total se divide entre el número de usuarios, por lo que el Ancho de Banda correspondiente al UE-1 es representado como  $\alpha$ , donde debe ser  $\alpha < BW$ , y para el segundo usuario es el ancho de banda restante, por lo tanto  $(BW - \alpha)$ , donde el ancho de banda a utilizar en LTE es de 15 MHz, y el ancho de banda para el UE-2, será el ancho de banda que el UE-1 no tome, Las fórmulas del rendimiento en los UE-1 y UE-2 respectivamente están dadas por:

$$R_1 = \alpha \log_2 \left( 1 + P_1 \frac{SINR}{\alpha} \right), R_2 = (1 - \alpha) \left( 1 + P_1 \frac{SINR}{1 - \alpha} \right) \quad (3.8)$$

Tomando en cuenta las fórmulas anteriores (3.8), ahora se aplicarán a nuestro escenario de simulación Figura 3.4, para OFMDA, donde nuestro BW es 15 MHz, y es dividido entre 20, para cada uno de los usuarios. En la Figura 3.11 podemos ver la transferencia de bit de cada uno de los 20 usuarios, donde el usuario con mayor Tasa de transmisión es el usuario más cercano a la BS, y el usuario con menor tasa de transmisión, el más lejano.

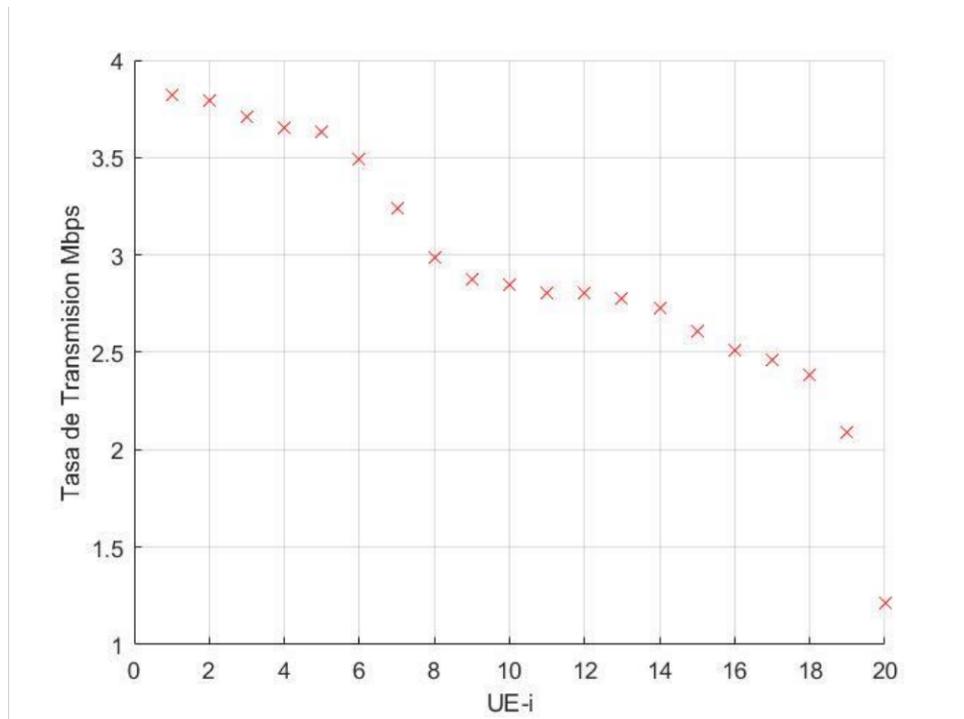


Figura 3.11 Tasa de Transmisión del Sistema con respecto a la SINR de cada usuario.

De la misma forma, para NOMA, calculamos la Tasa de Transmisión de cada UE-i, donde de igual manera que en OFDMA el ancho de banda se dividirá entre 20 subportadoras, pero en este caso cada subportadora tendrá 2 usuarios. Los primeros 20 usuarios tendrán la potencia de transmisión denotada como  $P_1$ , para este caso utilizaremos  $P_1 = \frac{1}{5}P$  para ejemplificar la asignación de recursos en NOMA,  $\left(P_1 = \frac{1}{5}P\right)$ , y el resto de la potencia de transmisión denotada como  $P_2$ , será asignada a los 20 usuarios restantes, por lo tanto, se representa como  $P_2 = \frac{4}{5}P$ ,  $2(P_2 = \frac{4}{5}P)$ , de tal forma que  $P_1 + P_2 = 1$ ; tal y como se muestra en la Figura 3.12 se puede observar la manera de particionar la potencia de las subportadoras para que cada una tenga 2 usuarios.

### Evaluación de la suma de tasas con esquemas de asignación de recursos en NOMA

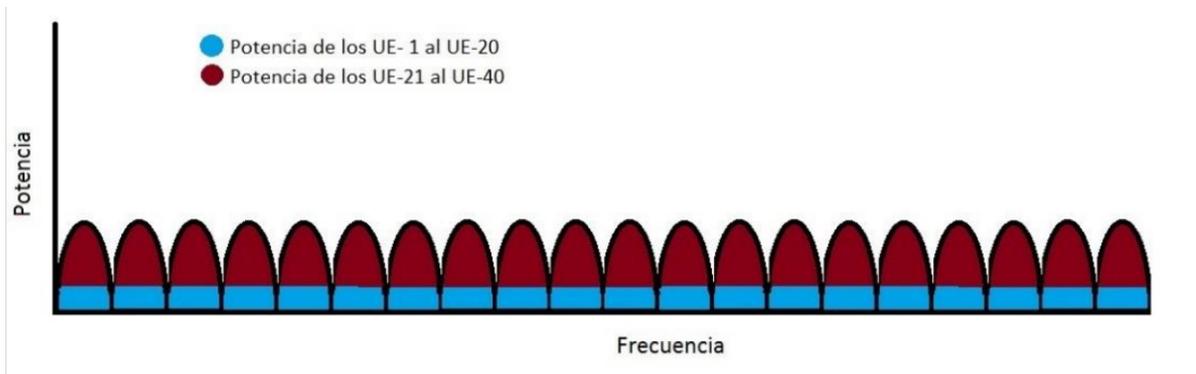


Fig. 3.12 Diagrama de las 20 subportadoras, y la potencia de cada uno de los UE-*i*'s

En la figura 3.13 podemos ver como los usuarios más cercanos a la estación base, tomaron la potencia P1, mientras que los usuarios más lejanos tomaron la potencia P2 de cada subportadora,

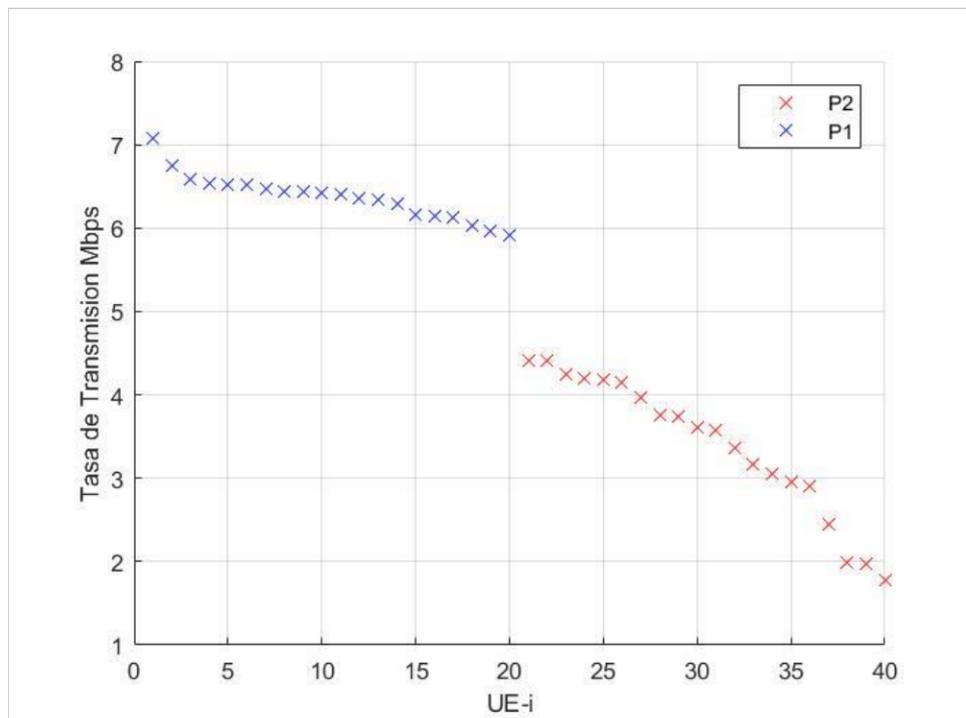


Figura 3.13 Tasa de transmisión del escenario de simulación NOMA de 2 usuarios por subportadora, con  $P1 = 1/5P$ , y  $P2 = 4/5P$ .

En el siguiente escenario se reduce la diferencia existente entre la Potencia 1 y la Potencia 2, donde

ahora  $P_1 = \frac{2}{5}P$  y  $P_2 = \frac{3}{5}P$ , en la Fig. 3.16 observamos cómo se reduce significativamente la

diferencia de Tasa de transmisión existente entre los usuarios que trabajan con la Potencia 1 y la

Potencia 2, pero el máximo de Tasa de Transmisión baja, mientras que el mínimo de Tasa de

Transmisión no sufre grandes cambios, por lo que es más recomendable trabajar con los

parámetros de la Figura 3.14.

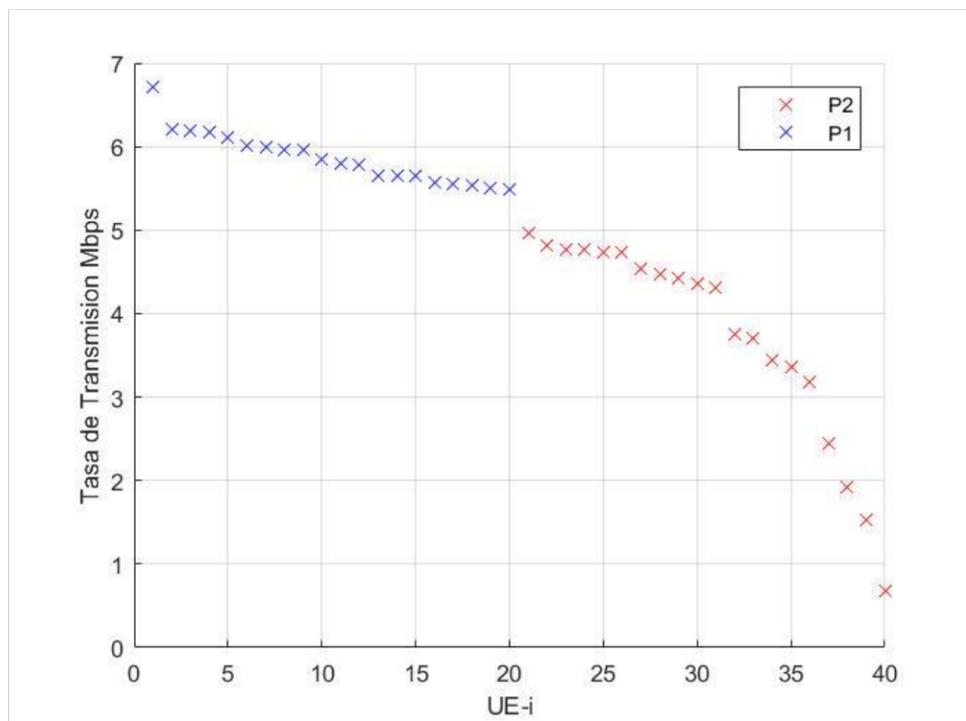


Figura 3.14 Tasa de transmisión del escenario de simulación NOMA de 2 usuarios por subportadora, con  $P_1 = 2/5P$ , y  $P_2 = 3/5P$ .

Claramente se observa cómo además de aumentar el número de usuarios al doble que en OFDMA, la tasa de transmisión de cada usuario aumenta considerablemente en NOMA con respecto a OFDMA

## CAPITULO 4 Suma de tasas de transferencia de datos en NOMA

### 4.1 Esquema 1 de asignación de usuarios.

El primer escenario que se analizará será el de la Figura 4.1, el cual, asigna a los 20 usuarios más cercanos a la estación base las subbandas de la 1 a la 20 respectivamente a su distancia y la potencia  $P_1$ , de igual manera a los siguientes 20 usuarios se les asigna la subbanda de la 1 a la 20 con respecto a su distancia del más cercano al más lejano, pero a diferencia de que estos tendrán la potencia  $P_2$ . De tal forma que en la subbanda 1, se asigna el usuario 1 (el cual presenta mayor ganancia de canal por tener menor distancia a la estación base) y el usuario  $(N/2)+1$ , donde  $N$  representa el número total de usuarios, en este caso es igual a 40 ya que se asignan 2 usuarios por subbanda, De la misma manera en la subbanda 2 se asigna el usuario 2 y el usuario  $(N/2)+2$ , donde el usuario 2 presenta mayor ganancia de canal.

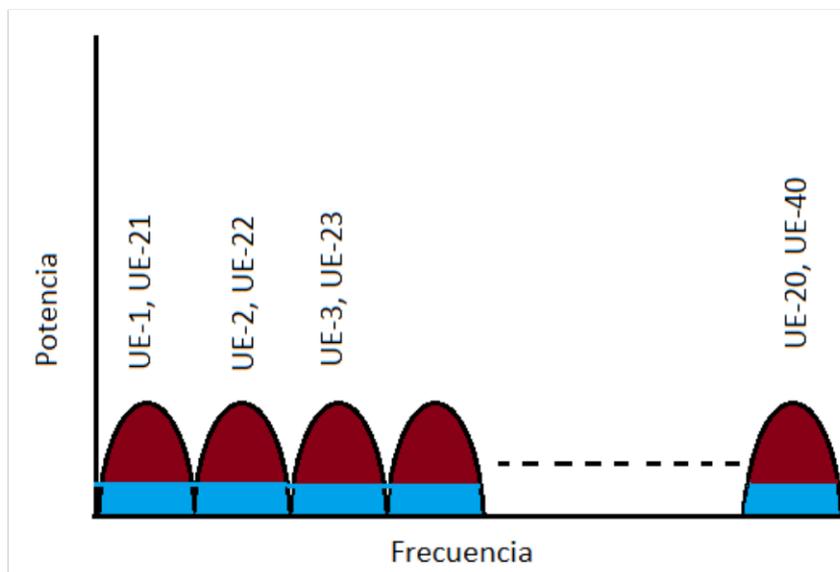


Figura 4.1 Diagrama del primer escenario de la repartición de usuarios por sub-banda, Reparte los usuarios con respecto a su distancia de la RB, donde los usuarios más cercanos cuentan con la  $P_1$  y los siguientes 20 usuarios con la  $P_2$ .

En la Figura 4.2 observamos la Suma de Tasas de transmisión por subportadora, y observamos como las primeras sub-bandas tienen mayor eficiencia a diferencia del resto.

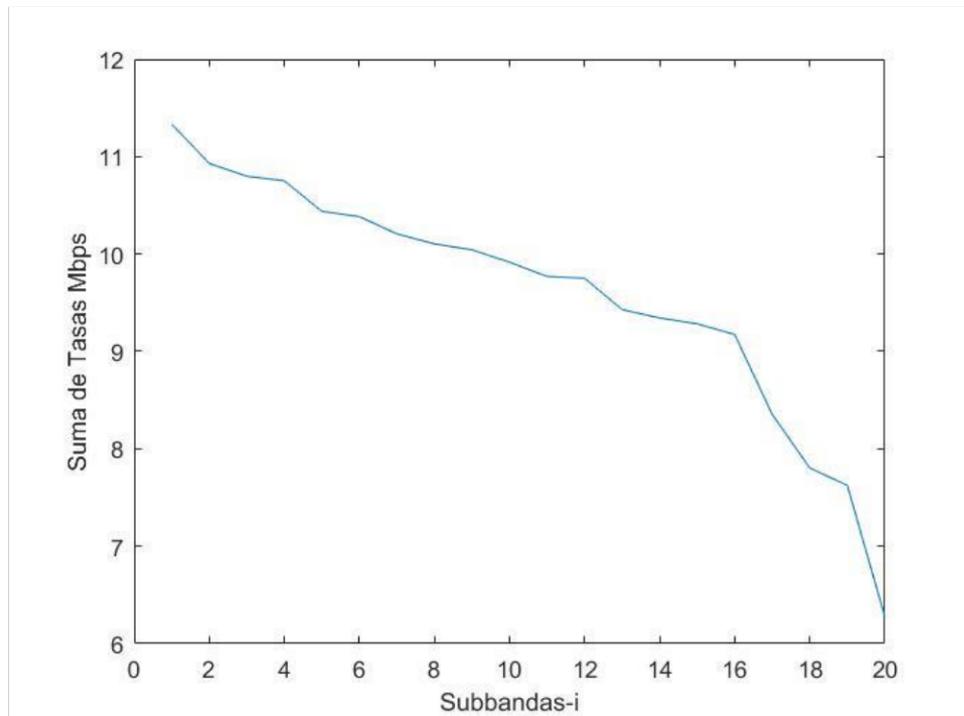
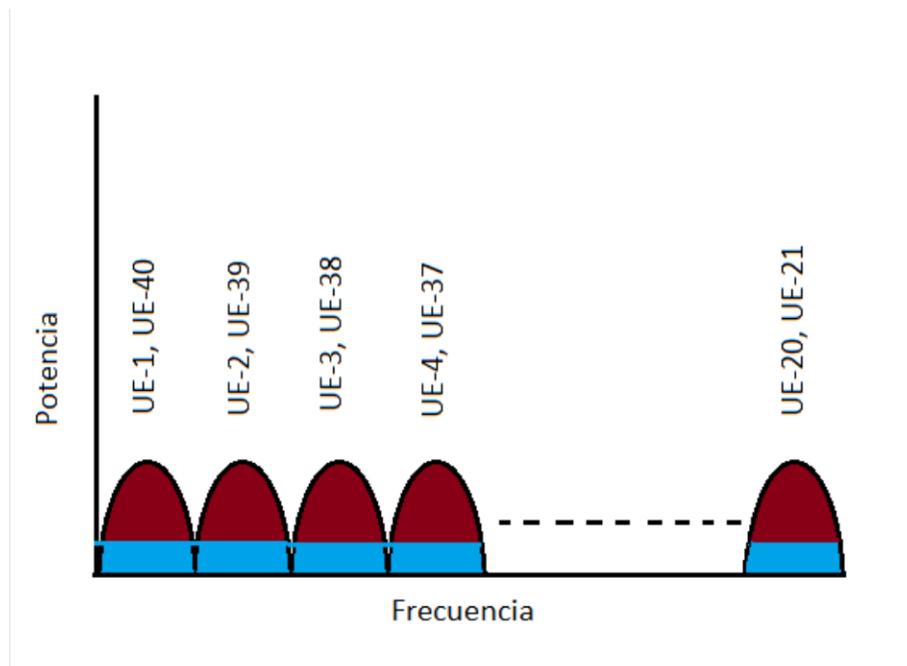


Figura 4.2 Suma de Tasas de Transmisión de la Fig. 4.1

#### 4.2 Esquema 2 de asignación de usuarios

El segundo escenario se presenta en la Figura 4.3, a diferencia del esquema de asignación 1, ahora en la subbanda 1 se asignan el usuario 1 y el usuario N, es decir se asigna el usuario más cercano a la estación base con la mayor ganancia de canal y al usuario más lejano, con la menor ganancia. De igual forma a la subbanda 2 se asignan el usuario 2 y el usuario N-1.



*Figura 4.3 Diagrama del Segundo escenario, división de usuarios por subportadora, donde cada subportadora cuenta con el primer usuario más cercano a la RB, y el segundo usuario más lejano de la RB.*

En la Figura 4.4 se observa la suma de tasas de transmisión del segundo evento, donde ahora las subbandas más eficientes son las últimas, comparando con el esquema de asignación 1, las subbandas con menor suma de tasas en dicho esquema (19 y 20) alcanzan una suma de tasas de transmisión de hasta 7 Mbps, mientras que en este esquema las subbandas con menor suma de tasas son las primeras (1 y 2) alcanzan una suma mayor a 7.5 Mbps, por otro lado las subbandas con mayor suma de tasas en el esquema 1 (1 y 2) tienen una suma de tasas mayor a 11 Mbps, mientras que en el esquema 2 las subbandas con mayor suma de tasas (19 y 20) no superan los 10 Mbps. Lo que nos dice que para las primeras subbandas el esquema 2 tiene un mejor rendimiento en comparación con el 1, pero en las últimas subbandas ocurre lo contrario, el esquema con mejor rendimiento es el 1.

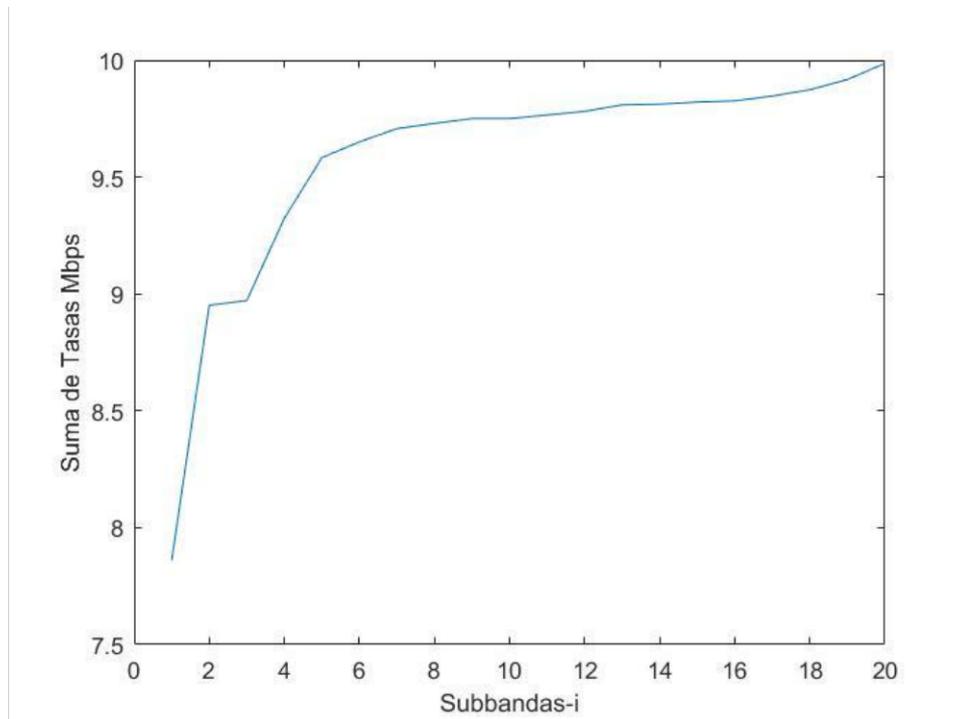


Figura 4.4 Suma de Tasas de Transmisión del escenario de la fig. 4.3

### 4.3 Esquema 3 de asignación de usuarios

Por último, se emplea un tercer esquema para la asignación de usuarios, en el cual la primer subbanda es asignada a los primeros dos usuarios más cercanos a la estación base, los cuales presentan mejor ganancia de canal, de la misma forma, la siguiente subbanda es asignada a los siguientes dos usuarios más cercanos a la estación base, y así sucesivamente el resto de subbandas, como se muestra en la Figura 4.5.

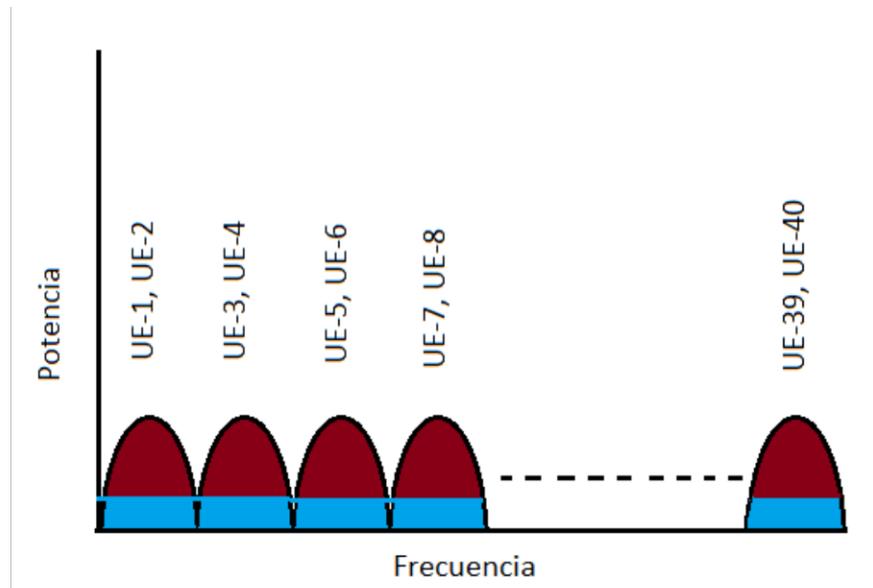


Figura 4.5 Tercer escenario, las sub-bandas reciben a los usuarios con respecto a su distancia.

De la Figura 4.6 se puede observar la suma de tasas de transmisión del esquema 3, en el cual, las subbandas más cercanas a la estación base (1 y 2) son las que presentan mayor suma de tasas de transmisión llegando cerca de los 13 Mbps, en cambio las que presentan menor suma de tasas de transmisión son las últimas subbandas (19 y 20) las cuales presentan una suma de tasas de hasta 4 Mbps. Como podemos observar en este esquema la suma de tasas va en decremento conforme las subbandas se encuentran más lejanas de la estación.

Comparando este Esquema de asignación con los anteriores (Esquema 1 y 2), podemos notar que a comparación del Esquema 1 este presenta mayor suma de tasas en las primeras subbandas (1 y 2), en el esquema 1 dichas subbandas presentaban una suma de tasas poco mayores a los 11 Mbps, mientras que en este esquema las primeras subbandas presentan una suma de tasas muy cercana a los 13 Mbps, en cuanto a las últimas subbandas (19 y 20) ambos esquemas presentan una suma de tasas baja, siendo en el esquema 1 muy cercana a los 6 Mbps y en el esquema 3 de hasta 4 Mbps.

En el caso de la comparación entre el esquema 2 y 3 el primero presenta una suma de tasas muy inferior, en las primeras subbandas (1 y 2), siendo cercanamente a lo 8Mbps, respecto al esquema 3 que presenta una suma de tasas cercana a los 13 Mbps, mientras que en las últimas subbandas (19 y 20) el primer esquema presenta una suma de tasas de 10 Mbps y el esquema 3 presenta una suma de tasas de hasta 4Mbps, siendo muy inferior a su contraparte.

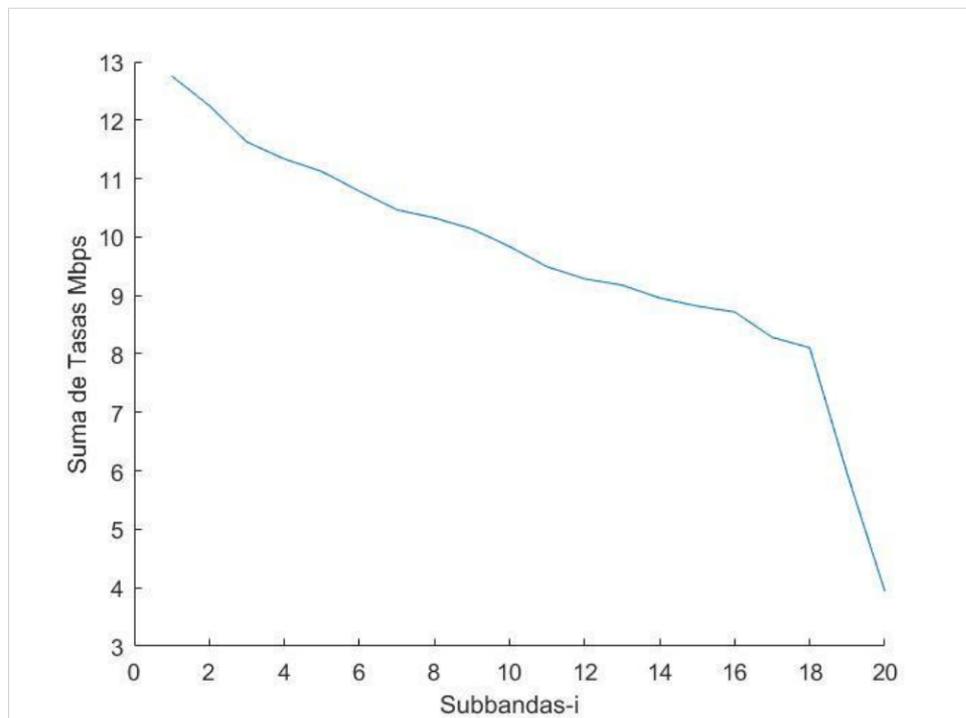


Figura 4.6 Suma de Tasa de Transmisión del escenario de la Figura 4.5.

#### 4.4 Combinación de NOMA y Ondas Milimétricas

Como se ha hablado con anterioridad, las ondas milimétricas, son una de las opciones para la implementación de 5G por los beneficios que ofrece. El ancho de banda de las ondas milimétricas es de 600 MHz, por lo que es con el ancho de banda con el que trabajaremos.

#### 4.4.1 Tasa de Transferencia

De igual manera, se calcula la tasa de transferencia del escenario dos de la Figura 4.3, donde la tasa de transferencia de cada usuario se observa en la Figura 4.8.

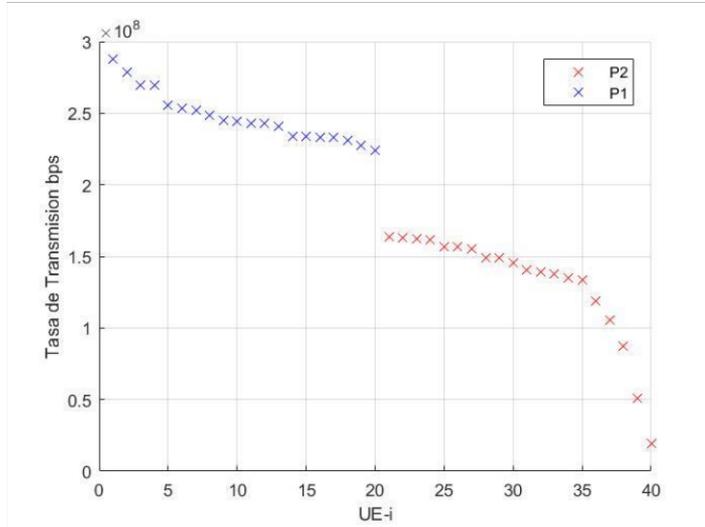


Figura 4.8 Tasa de Transferencia de cada usuario, con el escenario 2 de la fig. 4.3, con un ancho de banda de 600MHz.

#### 4.4.2 Suma de Tasa de Transferencia

En la Figura 4.9 Se muestra la Suma de Tasa de Transferencia con los usuarios repartidos en las subbandas como el escenario dos de la Figura 4.3, al ser el que mejor se desenvuelve de los tres escenarios.

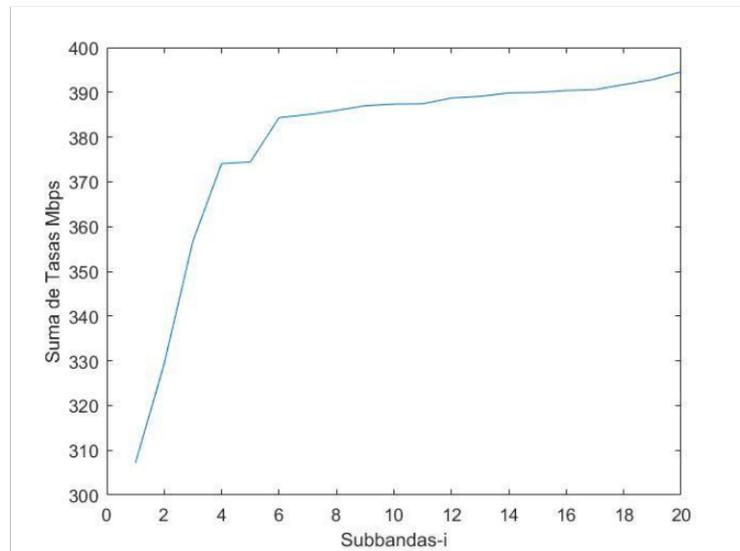


Figura 4.9 Suma de Tasas de Transferencia de los UE-I's de la Fig. 4.8, repartiendo los usuarios entre las subbandas como el escenario dos de la Figura 4.3

## Conclusiones

Hoy en día las bandas de frecuencia necesarias para las comunicaciones inalámbricas son un recurso muy limitado, estamos en una época donde hay una batalla por el espectro electromagnético, es por eso que se buscan alternativas para maximizar el uso de los recursos. El uso de ondas milimétricas y del acceso múltiple no ortogonal (NOMA), prometen mejorar las condiciones de la actual generación de redes móviles (4G).

Los sistemas celulares 5G usando ondas milimétricas, implementan celdas cuyo radio no pasa del orden de los metros, tomando en cuenta los modelos de propagación para 5G se observa que más allá de los 120 m las pérdidas de trayecto comienzan a ser considerablemente grandes, por lo que no sería posible la comunicación a grandes distancias haciendo uso de esta banda de frecuencias, a pesar de esto las ventajas con las que cuentan las ondas milimétricas son grandes, la principal es el espectro de operación con el que trabaja, con el cual aumenta el ancho de banda y por tanto la velocidad de transferencia.

A lo largo de este trabajo, lejos de definir nuevos modelos de propagación, se intentó hacer una recopilación de los modelos propuestos para la implementación de ondas milimétricas con el fin de comparar cada uno de ellos y tener una mayor comprensión de lo vulnerables que son las ondas de radio frecuencia milimétricas a la hora de propagarse, ya que como se mencionó anteriormente son muy propensas a presentar pérdidas cuando se propagan en largas distancias, además de observar a partir de la comparación de los modelos de propagación propuestos para ondas milimétricas cual nos permite una mejor caracterización de pérdidas en un ambiente previamente definido.

El uso de NOMA ayuda a que no haya un “desperdicio” de recursos, aunque la SIR para el caso de NOMA en comparación con OFDMA es relativamente más bajo, esto debido a que hay más interferencia ya que más de un usuario utiliza la misma subportadora, esto se compensa con la tasa de transmisión, ya que para OFDMA tenemos tasas de transmisión alrededor de 4 Mbps, mientras que con NOMA tenemos tasas de transmisión de hasta de casi el doble.

La combinación de ambas tecnologías resulta ser muy prometedora para las futuras redes móviles de 5ta generación, donde apreciamos como las tasas de transmisión aumentan de gran forma por la combinación con las ondas milimétricas, donde a pesar de sufrir grandes pérdidas en tan pocos metros, se compensa por las grandes velocidades de transmisión que se pueden manejar.

## **Trabajos a Futuro**

En el presente trabajo se propuso una metodología de asignación de usuarios por subportadora bajo el esquema de asignación de NOMA, dicho esquema distribuye a los usuarios dependiendo de sus condiciones de canal, al maximizar el uso de los recursos disponibles en el sistema ya que se emplea un método que no había sido utilizado antes por otra tecnología de acceso múltiple, la compartición en el dominio de la potencia.

Como resultado de este proyecto de investigación, existen diversas líneas que quedan abiertas y sobre las cuales es posible seguir trabajando. En este sentido se proponen los siguientes puntos:

- Modificar los esquemas de asignación de usuarios por subportadora y de potencia, para poder evaluar su desempeño y así determinar que método de asignación conlleva a los mejores resultados.
- Aumentar el número de usuarios asignados por subportadora, para poder determinar la eficiencia del sistema, así como maximizar las tasas de transferencia.
- Determinar el número máximo de usuarios que podrían ser asignados a cada subportadora, con el fin de establecer un número aproximado de usuarios, que podrían operar dentro de una celda celular determinada bajo el esquema NOMA.
- Establecer la potencia mínima asignada a un usuario que permita maximizar su tasa de transferencia.
- Intentar combinar la tecnología usada en este proyecto (NOMA) con las otras propuestas para la siguiente generación de redes celulares.

Cabe mencionar que estos puntos nos son los únicos sobre los cuales se puede seguir trabajando, pudiéndose extender esta lista.

## Referencias

- [1] Andrea S. Marcano, Henrik L. Christiansen. (2017). A novel method for improving the capacity in 5G mobile networks combining NOMA and OMA. IEEE, 1, 5.
- [2] B.Anass,S.Yuya,K.Yoshihisa,L.Anxin,H.Atsushi,N.Takehirp. (2013). Concept and Practical Considerations of Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) for Future Radio Access. Radio Access Network Development Department, 1, 5.
- [3] B.Naga,L.Junyi,M.Durga,G.Rob,B.Dean,D.Aleksandar,S.Ravi,P.Chirag. (February 2014). Network Densification: The Dominant Theme for Wireless Evolution into 5G. IEEE Communications Magazine, 1, 8.
- [4] Carlos E. Uc-Rios and Domingo Lara-Rodriguez. (2014). An ON-OFF Synchronous Sectorized Operation for Packet Data Transmission in Cellular Systems.. Communications Section, Electrical Engineering Department, 1, 4.
- [5] D.Linglong,W.Bichai,Y.Yifei. (September 2015). Non-Orthogonal Multiple Access for 5G: Solutions, Challenges, Opportunities, and Future Research Trends. IEEE Communications Magazine, 1, 8.
- [6] Dier J. Cichon. (2012). Propagation Models for Small-and-Micro-Cells. IEEE, 1, 149-166.
- [7] Ing. Reiner Alonso Quintana,Ing.Raikel Bórdon Lopez, Msc. Samuel Montejo Sánchez. (2014). Estudio Comparativo de los Modelos de Propagación de canal inalámbrico. IEEE, 1, 55.
- [8] Josefina Castañeda-Camacho. (November 2003). Reverse Link Erlang Capacity of Multiclass CDMA Cellular System Considering Nonideal Antenna Sectorization. Camacho, Student Member, IEEE, 1, 13.
- [9] K.R. Krishnan, Hanan Luss. (2001). Power Selection for Maximizing SINR in Femtocells for Specified SINR in Macrocell. Telcordia Technologies, 1, 6.

- [10] L.Qian,N.Huaning,P.Apostolos. (March 2014). 5G Network Capacity Key Elements and Technologies. IEEE vehicular technology magazine, 1, 8.
- [11] O.Afif,B.Federico,B.Volker. (May 2014). Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications: The Vision of the METIS Project. IEEE Communications Magazine, 1, 10.
- [12] Quang-Tuang Thieu,Chung Wang,Chung-Hsiung Wang. (2015). Design and Implementation of NOMA Subband Scheduling Towards Larger Bandwidth Beyond LTE-A. IEEE, 1, 7.
- [13] R.Wonil, S.Ji-Yun,P.JeonHo,L.Byunghwan,L.Jaekon. (February 2014). Millimeter-Wave Beamforming as an Enabling Technology for 5G Cellular Communications: Theoretical Feasibility and Prototype Results. IEEE Communications Magazine, 1, 8.
- [14] Sergey N. Moiseev,Mikhail S. Kondakov. (August 2009). Prediction of the SINR RMS in the IEEE 802.16 OFDMA System. IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, 57, 5.
- [15] Shu Sun,George MacCartney. (April 2016). Millimeter-Wave Distance-Dependent Large-Scale Propagation Measurements and Path Loss Models for Outdoor and Indoor 5G Systems. ce-Dependent Large-Scale Propagation Measurements and Path Loss Models for Outdoor and Indoor 5G Systems,” in the 10th European Conference on Antennas and Propagation , 1, 6.
- [16] T.S.Rappaport. (2013). Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements. IEEE, 1, 4.
- [17] T.S.Rappaport. (2014). Propagation Path Loss Models for 5G Urban Micro and Cellular Scenarios. IEEE, 1, 6.
- [18] Union Internacional de Telecomunicaciones. (2016). UIT-R P.1238-8. UIT-R Sector de Radiocomunicaciones de la UIT, 1, 24.
- [19] Union Internacional de Telecomunicaciones. (2016). Recomendación UIT-R P.1411-8. UIT-R Sector de Radiocomunicaciones de la UIT, 1, 48.

- [20] W. Cheng-Xiang, H. Fourat. (February 2014). Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks. IEEE Communications Magazine, 1, 9.
- [22] Y. Lan, X. Chen, H. Jlang. (2015). Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) for Future Downlink Radio Access of 5G. China Communications, 1, 10.
- [22] Y. Mehmood, W. Azfal. (13-14 September 2013). Large Scaled Multi-User MIMO System so called Massive MIMO Systems for Future Wireless Communication Networks. Department of Electrical Engineering, 1, 4.
- [23] Yi Chen, Chi Wan Sung. (2018). Characterization of SINR Region for Multiple Interfering Multicast in Power-Controlled Systems. IEEE, 1, 11.
- [24] Zhiqiang Wei, Jiajia Guo. (2017). Fairness Comparison of Uplink NOMA and OMA. IEEE, 1, 6.