



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ANÁLISIS DE LA TÉCNICA NOMA-SCMA EN PRESENCIA DE
DESVANECIMIENTO DE TIPO RICE

AUTORES

Efrén Mauricio Oña Proaño
Dennis Alejandro Lara Hernández

AÑO

2020



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ANÁLISIS DE LA TÉCNICA NOMA-SCMA EN PRESENCIA DE
DESVANECIMIENTO DE TIPO RICE

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los
requisitos establecidos para optar por el título de Ingenieros en
Redes y Telecomunicaciones

Profesor guía
PhD. Henry Ramiro Carvajal Mora

Autores

Efrén Mauricio Oña Proaño
Dennis Alejandro Lara Hernández

Año

2020

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido el trabajo, Análisis de la Técnica NOMA-SCMA en Presencia de Desvanecimiento de Tipo Rice, a través de reuniones periódicas con los estudiantes Efrén Mauricio Oña Proaño, Dennis Alejandro Lara Hernández, en el semestre 202010, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".



Henry Ramiro Carvajal Mora

Doctor en Ingeniería Eléctrica en el Área de Telecomunicaciones Y Telemática

C.C. 1721327862

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

"Declaro haber revisado este trabajo, Análisis de la Técnica NOMA-SCMA en Presencia de Desvanecimiento de Tipo Rice, de los estudiantes Efrén Mauricio Oña Proaño, Dennis Alejandro Lara Hernández, en el semestre 202010, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".



Nathaly Verónica Orozco Garzón

Doctor en Ingeniería Eléctrica en el Área de Telecomunicaciones Y Telemática


C.C. 1720938586

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DE LOS ESTUDIANTES

“Declaramos que este trabajo es original, de nuestra autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”



Efrén Mauricio Oña Proaño
C.C.:1716086333



Dennis Alejandro Lara Hernández
C.C.:0604934356

AGRADECIMIENTOS

Mi eterna gratitud a todas las personas que en mayor o menor medida me han apoyado a lo largo de esta etapa de mi vida, en especial a mi familia y mis profesores.

Efrén Oña

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la perseverancia necesaria para terminar esta etapa de mi vida, a mi familia y amigos que me apoyaron todo momento durante todo este trayecto y al Prof. Dr. Henry Carvajal por su paciencia y apoyo brindado durante la realización de este trabajo.

Dennis Lara

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a tres personas, mi madre, quien con su apoyo supo demostrarme que nunca es tarde para cumplir una meta. A Clarita, que fue el puntal al cual pude apoyarme para no decaer. Y a mi amado hijo, a quien le debo todo.

Efrén Oña

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mis padres, tía y hermanos por apoyarme en los momentos más difíciles y a Pedro Nogales que me permitió ver todo el potencial que tenía dentro de mí y con sus palabras no permitirme rendir en ningún momento.

Dennis Lara

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se evalúa el desempeño de la técnica *Sparse Code Multiple Access* (SCMA) en un canal inalámbrico con desvanecimiento de tipo Rice y presencia de interferencia de usuarios de la misma célula y de las co-células. El desempeño se evalúa considerando diversos escenarios de operación. Específicamente, se realizan simulaciones del sistema considerando un ambiente unicelular y celular, es decir, escenarios con una sola célula y con múltiples células. Con este fin, se desarrollaron rutinas de simulación en el software MATLAB, las simulaciones se realizan utilizando el método de Montecarlo. Los resultados muestran el comportamiento del sistema SCMA en términos de la probabilidad de error de bit graficada en función de la relación señal a ruido. Estos resultados, permiten tener un mejor entendimiento del funcionamiento del sistema SCMA tanto en escenarios unicelulares como en escenarios con interferencia de las co-células. La investigación realizada en este trabajo puso en evidencia que el sistema SCMA tiene un mejor desempeño cuando existe línea de vista entre los terminales móviles y la estación radio base. No obstante, también se evidenció que el sistema es altamente afectado por la interferencia de las co-células, pero, a medida que el factor de reuso de canales se incrementa, los efectos de la interferencia de co-canal pueden ser mitigados, porque la distancia entre la radio base de interés y los usuarios interferentes aumenta. El costo en este caso es una reducción del número de canales de cada célula. Finalmente, para todos los escenarios simulados y analizados, se considera una modulación 16-QAM

Palabras clave: Canal inalámbrico, desvanecimiento Rice, SCMA, interferencia.

ABSTRACT

In the present dissertation, it is evaluated the performance of the *Sparse Code Multiple Access* (SCMA) technique in a wireless channel with Rice-type fading and presence of interference. The performance is evaluated by considering various operating scenarios. Specifically, simulations of the system are performed considering a single cell and cellular environments. For this purpose, simulation routines were developed in the MATLAB software. These simulations are performed using the Monte-Carlo method. The results show the behavior of the SCMA system in terms of the bit error rate. These results are represented graphically as a function of the signal to noise ratio. They allow a better understanding of the SCMA system operation in both single-cell scenarios and multi-cell (cellular) scenarios. The research carried out in this work showed that the SCMA system performs better when there is line of sight between the mobile terminals and the radio base station. However, it was also evidenced that the system is highly affected by co-cell interference, but, as the channel reuse factor increases, the effects of co-channel interference are mitigated. The cost in this case is a reduction in the number of channels in each cell. Finally, for all simulated and analyzed scenarios, a 16-QAM modulation is considered

Keywords: Wireless channel, fading, SCMA, interference

ÍNDICE

Introducción	1
1. CAPÍTULO I. CONCEPTOS BÁSICOS	4
Introducción.....	4
1.1 Sistema Celular	5
1.1.1 Reúso de canales (F).....	7
1.1.1.1 Reúso Duro.....	9
1.1.2 Interferencia	9
1.1.3 Control de potencia	10
1.2 Canal Inalámbrico.....	11
1.2.1 Ruido aditivo gaussiano blanco.....	11
1.2.2 Desvanecimiento a pequeña escala y trayectoria múltiple	11
1.2.2.1 Caracterización de canales de trayectorias	
múltiples	12
1.2.2.2 Parámetros de canales con múltiples	
trayectorias.....	14
1.3 Diversidad	15
1.3.1 Diversidad en Frecuencia.	15
1.3.2 Diversidad Temporal	16
1.3.3 Diversidad Espacial de la Señal (SSD, del inglés <i>Signal</i>	
<i>Space Divesity</i>)	16
1.4 Técnicas de Acceso Múltiple	20
1.4.1 Acceso Múltiple por División de Frecuencias	
Ortogonales.	20
1.4.1.1 Implementación Digital.....	22
1.4.1.2 Canal de Guarda y Prefijo cíclico	22
1.4.2 Acceso Múltiple por Códigos Esparsos (SCMA)	24
1.5 Técnicas de Detección	25
2. CAPÍTULO II. DESEMPEÑO DEL SISTEMA SCMA	
EN CANALES CON DESVANECIMIENTO DE TIPO	
RICE	30
Introducción.....	30

2.1 Simulación del Canal con Desvanecimiento de Tipo Rice en Matlab	31
2.2 Transmisor SCMA en Matlab.....	33
2.3 Receptor SCMA en Matlab	37
2.4 Probabilidad de error de bit Calculada.....	43
3. CAPÍTULO III. DESEMPEÑO DEL SISTEMA SCMA EN ENTORNOS CELULARES.....	46
Introducción.....	46
3.1 Sistema Celular	47
3.2 Distribución espacial de los usuarios en las células	48
3.3 Resultados de la probabilidad de error de bit de SCMA con interferencia de los usuarios de las co-células.....	49
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
4.1 Conclusiones.....	54
4.2 Recomendaciones.....	55
Referencias	56

Introducción

En esta sección se describe la problemática a la cual se pretende dar solución en el presente trabajo. Además, se establecen las generalidades que se abordaran a lo largo del proyecto de titulación. Asimismo, se determinan los objetivos y alcance.

Antecedentes

Las tecnologías inalámbricas, son una parte importante de las redes de telecomunicaciones debido al gran crecimiento que ha sufrido el sector de la telefonía móvil. El rápido crecimiento del uso del teléfono móvil, servicios satelitales y acceso inalámbrico a internet están generando cambios a gran escala en estas tecnologías. El impacto de las comunicaciones inalámbricas ha sido, es y seguirá siendo importante, de tal manera que muy pocos inventos o desarrollos tecnológicos han sido capaces de transformar al mundo en tan corto tiempo (Stallings, 2005).

La quinta generación (5G), es un conjunto de tecnologías que tienen como objetivo garantizar una capacidad masiva de tráfico por medio de velocidades elevadas y usando el espectro de frecuencia de una manera eficiente. Además, 5G está prevista para mitigar situaciones críticas con una latencia muy baja y un grado alto de confiabilidad, disponibilidad y seguridad (Barreno, Carrión y Tenecora, 2016, p. 10), (Perea, 2014).

Existen dos tipos de técnicas de acceso múltiple no ortogonal (*Non-Orthogonal Multiple Access-NOMA*). La primera técnica *NOMA*, se realiza en el dominio de la potencia y se caracteriza porque utiliza la codificación de superposición (SC) en el transmisor y la cancelación de interferencia sucesiva en el receptor. Por otra parte, *NOMA* en el dominio de código, se basa en el uso de secuencias de ensanchamiento y codificación específicas para cada usuario. Este tipo de secuencias son dispersas y de correlación cruzada no ortogonal, es decir, que

tienen un bajo coeficiente de correlación (Riazul, Avazov, Dobre y Kwak, 2016, pp. 1-5).

Acceso Múltiple por Código Disperso (*Sparse Code Multiple Access - SCMA*), fue propuesto por Nikopour (Nikopour y Baligh, 2013). El SCMA pertenece a las técnicas NOMA y tiene una probabilidad alta para ser implantada en 5G (Huawei, 2015). Con esta técnica, en el transmisor, los bits son codificados y asignados directamente a palabras código multidimensionales (*CodeWords*) que se caracterizan por ser complejas. Cada usuario tiene un conjunto de palabras código diferente de otros usuarios. Este conjunto se conoce como "*CodeBook*" (Tahezadeh, Nikopour, Bayesteh y Baligh, 2014, pp. 1-5). Las palabras código de diferentes usuarios se superponen de forma no ortogonal y dispersa. De esta manera se consigue una sobrecarga del sistema y disminución de la interferencia co-canal. Sobrecarga, implica que el número de usuarios simultáneo es mayor que el número de canales de radio del sistema, lo que implica un aumento de la eficiencia espectral. En el receptor se hace la detección multiusuario conjunta seguida de la decodificación del canal para la recuperación de datos (Tahezadeh, Nikopour, Bayesteh y Baligh, 2014, pp. 1-5).

Luego de realizar una revisión bibliográfica exhaustiva se determina que, en la literatura se observa que no existe algún tema similar que haya evaluado el desempeño de *Sparse Code Multiple Access* en presencia de desvanecimiento de tipo Rice. Este tipo de distribución permite modelar el canal de comunicaciones inalámbrico en diferentes escenarios de operación considerando una línea de vista entre el transmisor y el receptor. Además, se destacan los escenarios sin línea de vista entre los terminales móviles y la estación radio base en un sistema celular (distribución Rayleigh). Por lo tanto, se determina que la realización del análisis de un sistema RICE constituye un aporte al estudio de SCMA.

Alcance

Este proyecto de titulación pretende analizar el desempeño de *Sparse Code Multiple Access* (SCMA), en presencia del desvanecimiento de tipo Rice utilizando simulaciones mediante el uso del software MATLAB en diferentes escenarios de operación.

En esta simulación se pretende modelar un canal inalámbrico con desvanecimiento de tipo Rice, para su posterior evaluación de desempeño del sistema SCMA en diferentes escenarios de operación en términos de la probabilidad de error de bit.

Para el desarrollo de esta propuesta de simulación se estudiará y analizará la estructura del transmisor y receptor de sistemas SCMA. Además, se aspira implementar un sistema SCMA en un ambiente celular utilizando rutinas en el software Matlab que permitan obtener los resultados de su comportamiento.

Justificación

De lo indicado en los apartados anteriores, se determina que SCMA es una propuesta viable e interesante para sistemas de quinta generación. Adicionalmente, de acuerdo con la literatura y los antecedentes, se puede evidenciar que no hay propuestas relacionadas con el análisis del desempeño de SCMA en presencia de desvanecimiento de tipo Rice.

Debido a esto, se considera que el desarrollo de este proyecto de titulación permitirá analizar y aportar información relevante para la implementación de SCMA en 5G. En este sentido, los resultados de este análisis sentarán las bases para futuros temas relacionados con el sistema SCMA.

Objetivo General

Analizar el desempeño de *Sparse Code Multiple Access* (SCMA) en el canal Rice en presencia de interferencia en diferentes escenarios de operación.

Objetivos Específicos

- Modelar un canal inalámbrico con desvanecimiento de tipo Rice.
- Entender y analizar la estructura de transmisor y receptor de sistemas SCMA.
- Simular un sistema SCMA en un ambiente celular utilizando rutina en el software MATLAB.
- Evaluar el desempeño del sistema SCMA en el canal Rice en diferentes escenarios de operación, en términos de la probabilidad de error de bit.

1. CAPÍTULO I. CONCEPTOS BÁSICOS

Introducción

El espectro radioeléctrico debe ser usado de forma eficiente debido a que es un recurso natural limitado, lo cual conlleva a que se busque la manera de maximizar la capacidad y cobertura de redes de comunicaciones inalámbricas. Existen varias técnicas para este fin, de entre las cuales las que más se han ido desarrollando con el tiempo son las técnicas de acceso múltiple usadas en los sistemas celulares (Carvajal, Bit Error Rate and Spectral Efficiency Evaluation of MC-CDMA Cellular Systems Employing Multiuser Detection, 2018).

Los sistemas celulares tienen como objetivo ofrecer servicios de comunicación de buena calidad a un gran número de usuarios. Por lo cual, existen técnicas que permiten la adecuada operación de estos sistemas, como son la reutilización de canales y las técnicas de acceso múltiple, antes mencionadas. Además, en la actualidad los servicios de comunicación requieren de una alta velocidad de datos y así, cumplir con las exigencias de los diseños modernos de sistemas

celulares. Por lo tanto, es necesario que los esquemas de modulación eficientes sean utilizados.

Dentro de la problemática de los sistemas celulares, se tiene que las señales de radio se degradan por los efectos del canal y por la interferencia que se produce por otros dispositivos dentro del sistema. No obstante, existen técnicas para poder aplacar este tipo de problemas, como el reusó de frecuencias o control de potencia (Carvajal, Bit Error Rate and Spectral Efficiency Evaluation of MC-CDMA Cellular Systems Employing Multiuser Detection, 2018).

El objetivo de este capítulo es presentar algunos conceptos básicos con la finalidad de que el lector pueda comprender el desarrollo de este trabajo. Así, abordaremos aspectos relacionados con el sistema celular, la influencia de las interferencias dentro de este y el análisis de las señales que son transmitidas por los equipos de usuario (UE), las cuales son recibidas por sus correspondientes estaciones base (BTS). Además, describiremos la técnica de acceso múltiple SCMA, que es la base del presente trabajo de titulación.

Este capítulo se encuentra organizado de la siguiente manera. Los sistemas celulares se describen en la Sección 1.1. Los canales inalámbricos en la Sección 1.2. Las técnicas de diversidad en la Sección 1.3. Después, se describe las técnicas de acceso múltiple, en la sección 1.4

1.1 Sistema Celular

La creación de los sistemas celulares dio paso al inicio de la revolución inalámbrica, estos sistemas en un principio fueron diseñados para terminales móviles, para luego ser colocados en vehículos donde la antena estaba ubicada en la parte superior de la carrocería. Con el paso del tiempo, estos sistemas fueron evolucionando hasta que se desarrollaron terminales móviles portátiles que operan dentro o fuera de edificaciones o vehículos (GoldSmith, 2005).

A través de las técnicas establecidas, los sistemas celulares facilitan la comunicación de forma bidireccional tanto de voz como de datos con cobertura regional, nacional o internacional. Una técnica muy usada en estos sistemas es

la reutilización de frecuencias, que es posible debido a que la potencia de la señal disminuye con la distancia. Así, se puede reutilizar el mismo espectro de frecuencias, pero en posiciones separadas espacialmente con niveles bajos de interferencia (GoldSmith, 2005), (Rao, Bojkovic, & Milovanovic, 2009).

Técnicamente, el área de cobertura de un sistema celular puede modelarse usando celdas circulares y en cada una de estas celdas, se asigna un conjunto de canales, dicho conjunto se utiliza en otra celda a una determinada distancia.

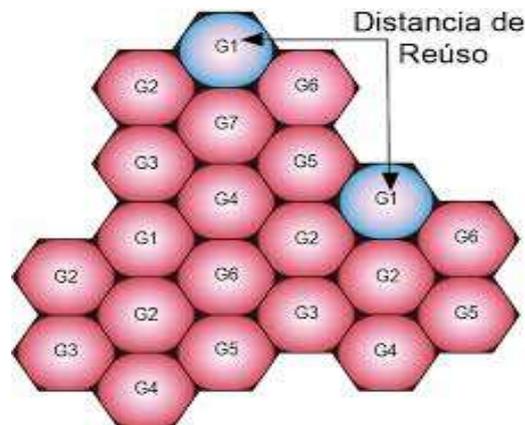


Figura 1: Sistema celular.

Tomado de (Alejos, Cruz, & Morales, 2013)

La operación dentro de cada celda se encuentra controlada por una estación base (en inglés: Base Transceiver Station (BTS)). Además, en el sistema puede existir la presencia de interferencia intercelular que se define como la interferencia causada por usuarios en las diferentes celdas que están operando en el mismo conjunto de canales. Para mitigar este tipo de interferencia debe existir una distancia de reutilización y de esta distancia dependerá la eficiencia espectral del sistema. Específicamente, la distancia de reutilización es la separación espacial de las células que reutilizan el mismo conjunto de canales (co-células), esto se puede observar en la figura 1. En este sentido, se considera que a mayor distancia menor interferencia y mayor eficiencia espectral (GoldSmith, 2005).

1.1.1 Reúso de canales (F)

A cada célula solo se le puede asignar una parte de los canales de comunicación que se encuentran disponibles en el sistema. En ciertos casos, en las células adyacentes se puede asignar diferentes canales. Todos los canales presentes en el sistema son asignados a un pequeño número de células denominado *clúster*. Este número de células en cada *clúster* es conocido como reúso de canales (F) (Rappaport, 1996). Los canales de comunicación solo pueden ser reutilizados en clústeres diferentes. Las co-células deben estar ubicadas a una gran distancia entre sí para asegurar que los niveles de interferencia sean razonables para que el sistema celular tenga un funcionamiento adecuado. No obstante, una mayor distancia entre co-células implica menos canales por célula.

Una célula puede ser considerada idealmente como una región circular, aunque esta representación geométrica involucra que existan áreas superpuestas o huecos. Por tal razón, es preferible el uso de hexágonos regulares para la representación convencional de las células. Como resultado de esta disposición geométrica, solo será posible el uso de valores enteros para F , los cuales se obtienen con la siguiente ecuación (Rappaport, 1996).

$$F = a^2 + ab + b^2$$

(Ecuación 1)

Donde a y b son números enteros no negativos. Cuando $F = 1$, todos los canales del sistema serán asignados a cada celda. En este caso, el esquema de reutilización es llamado reutilización universal. Considerando la geometría hexagonal de la figura 13, se puede mostrar que la distancia entre el centro de dos co-células está dada por D (Rappaport, 1996).

$$D = R\sqrt{3F},$$

(Ecuación 2)

dónde R es el radio exterior de la célula.

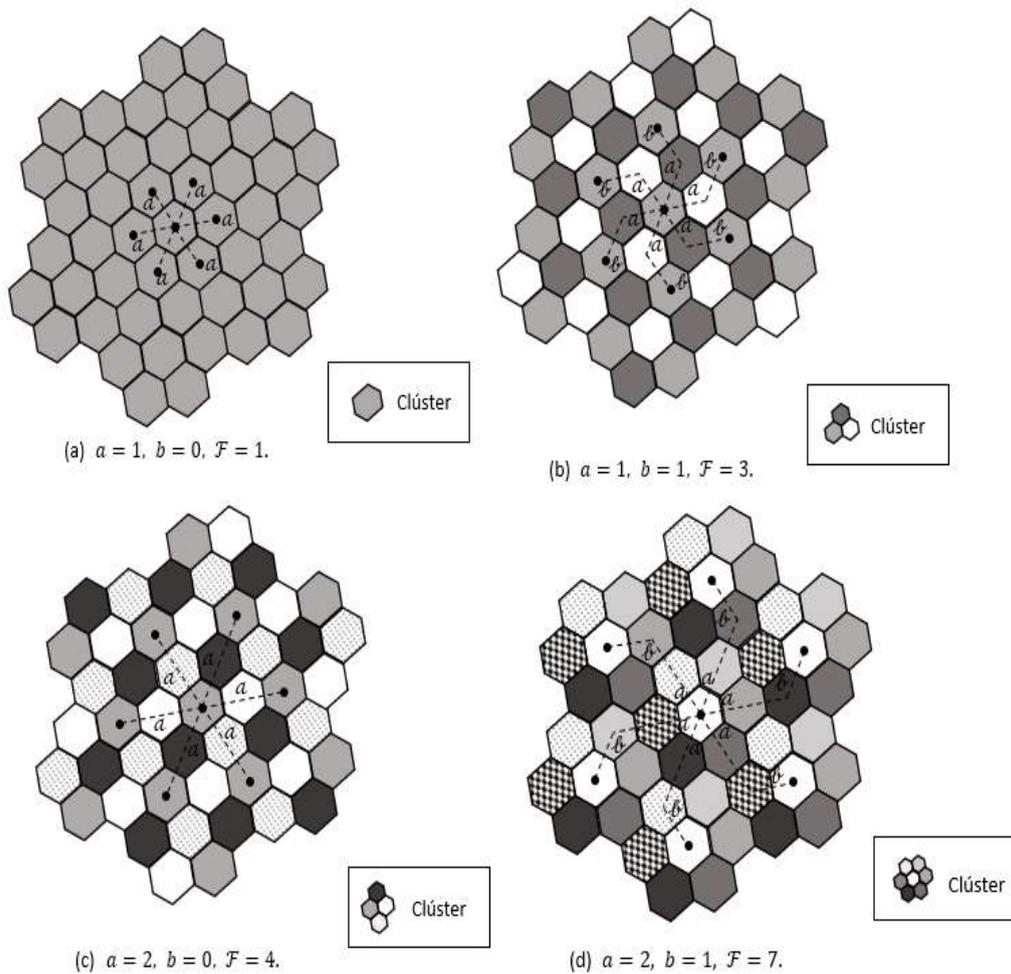


Figura 2. Factores de reutilización de canales en un sistema celular que emplea un esquema de reúso.

Adaptado de (Carvajal, 2018)

De acuerdo con la forma en que se van a asignar los canales dentro de cada célula, existe la posibilidad de establecer tres tipos de esquemas de reúso de canales: reúso duro, fraccional y suave. A los dos últimos esquemas se los conoce como técnicas de coordinación de interferencia entre células, las cuales fueron definidas por el Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP) para los sistemas *Long Term Evolution* (LTE) (Holma, Toskala, & Reunanen, LTE Small Cell Optimization: 3GPP, 2016).

A continuación, se hace un enfoque en el reúso duro que es el usado en este trabajo.

1.1.1.1 Reúso Duro

Se describe como reúso duro cuando todos los canales que están asignados a una sola célula son empleados en toda la región celular. La figura 2 ejemplifica diversos escenarios celulares considerando el esquema de reúso duro ($F = 1$; $F = 3$; $F = 4$; $F = 7$). Al analizar esta figura, se puede observar que cada célula tiene exactamente 6 co-células a igual distancia en la primera capa. Cabe mencionar que un F mayor representa menos canales por célula, esto se debe a que el número total de canales disponibles para el clúster, se divide para el número de células que lo conforman (Carvajal, Bit Error Rate and Spectral Efficiency Evaluation of MC-CDMA Cellular Systems Employing Multiuser Detection, 2018).

1.1.2 Interferencia

La interferencia es toda señal indeseable que llega a un receptor, siendo considerada como el limitador principal de la capacidad de un sistema celular.

▪ Origen de las interferencias

En el enlace ascendente del terminal móvil a la estación base, la interferencia es producida por otros usuarios que están transmitiendo dentro de la misma célula y co-células. En el enlace descendente de la BTS al terminal móvil, la interferencia es provocada por las BTS en las co-células, siendo la interferencia media que afecta más fuerte aquella presente en el enlace ascendente (Yacoub, 2012).

Entre los tipos de interferencia se tiene:

- **Interferencia de acceso múltiple (MAI):** es aquella interferencia producida por los usuarios dentro de la misma célula.
- **Interferencia entre co-células (CCI):** producida por los usuarios en las co-células.

Existe la posibilidad de que aparezcan otros tipos de interferencia debido al

comportamiento del canal de comunicaciones. Entre las interferencias presentes está la interferencia entre símbolos (ISI) la cual es una distorsión de la señal producida cuando un símbolo que es transmitido interfiere en los símbolos que serán transmitidos más tarde. Otro tipo de interferencia que se puede dar es la interferencia entre subportadoras (ICI) la cual es una interferencia típica de los sistemas que emplean subportadoras ortogonales. Esta interferencia se genera cuando una subportadora produce interferencia en otras subportadoras al momento de que se pierde la ortogonalidad entre ellas (Carvajal, Bit Error Rate and Spectral Efficiency Evaluation of MC-CDMA Cellular Systems Employing Multiuser Detection, 2018).

1.1.3 Control de potencia

Dentro de sistemas celulares prácticos, la potencia de transmisión del equipo móvil se encuentra controlada de forma constante por la BTS en su célula, resolviendo de esta manera el problema de que los usuarios estén a diferentes distancias de la BTS. Este control de potencia también permite extender la duración de batería de los usuarios (Rappaport, 1996). En los sistemas celulares de tercera generación (3G) y cuarta generación (4G) se emplean controles de potencia altamente eficientes (Holma & Toskala, LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced, 2011), (3GPP, 2016). El control de potencia se produce modificando la potencia transmitida de cada usuario en la misma célula con el fin de obtener la misma potencia recibida para todos los usuarios en la BTS. De esta manera se puede escribir a la potencia de salida para cada usuario como:

$$P_t = K^{-1}P_{r,0}r^\beta,$$

(Ecuación 3)

Donde $P_{r,0}$ es la potencia recibida de forma constante en la BTS desde cada usuario dentro de la misma célula y r es la distancia entre el usuario y su BTS. Asimismo, K y β son respectivamente el factor de propagación y el exponente de pérdida de propagación, el producto $K^{-1}r^\beta$, posibilita que las señales transmitidas por los usuarios puedan alcanzar la BTS al mismo nivel de potencia.

Por último, es importante también tener en cuenta que $P_t \leq P_{t,max}$, donde $P_{t,max}$ es considerada como la potencia de transmisión máxima de un equipo de usuario (Carvajal, Bit Error Rate and Spectral Efficiency Evaluation of MC-CDMA Cellular Systems Employing Multiuser Detection, 2018).

1.2 Canal Inalámbrico

En la presente sección se describen las principales características del canal inalámbrico. Los Canales inalámbricos están afectados por ruido auditivo gaussiano blanco (en inglés *Additive White Gaussian Noise* (AWGN)). Además, existen diversos escenarios para este tipo de canal como por ejemplo cuando se considera la ausencia de línea de vista (NLOS) entre el transmisor y el receptor, en este caso se determina que es un modelo de tipo Rayleigh. Por otro lado, el escenario en el que si existe línea de vista (LOS), es decir, la componente principal de la señal no tiene obstáculos entre el transmisor y receptor

Además, presentaremos los parámetros que hay que tener en cuenta al momento de realizar una comunicación por medio de un canal inalámbrico y como estos influyen dentro de la comunicación en un sistema celular.

1.2.1 Ruido aditivo gaussiano blanco

El ruido aditivo gaussiano blanco (en inglés *Additive White Gaussian Noise* (AWGN)) está considerado como una variable aleatoria que sigue una distribución gaussiana de media cero y varianza uno. Además, se denomina aditivo porque tienen la particularidad de sumarse a la señal provocando error en la detección en el receptor.

1.2.2 Desvanecimiento a pequeña escala y trayectoria múltiple

Entre los diferentes fenómenos de propagación a pequeña escala, el más significativo es el desvanecimiento, el cual se trata de una fluctuación rápida de la amplitud de la señal durante un corto periodo de tiempo y una distancia

reducida. Para que se produzca este desvanecimiento existen factores entre los que se encuentran la propagación por trayectos múltiples, el ancho de banda de la señal, la velocidad del usuario y la velocidad de los objetos circundantes (Carvajal, Bit Error Rate and Spectral Efficiency Evaluation of MC-CDMA Cellular Systems Employing Multiuser Detection, 2018).

1.2.2.1 Caracterización de canales de trayectorias múltiples

Existe una relación directa entre las variaciones a pequeña escala de una señal de radio y la respuesta al impulso del canal. Es decir, el canal de radio puede ser modelado como un filtro lineal, el cual tiene una respuesta al impulso variante en el tiempo. La naturaleza de este tipo de filtro se da por la suma de amplitudes y retrasos de las diversas versiones de señal que llegan a la BTS y la naturaleza variante en el tiempo es dada por el movimiento del usuario. La respuesta al impulso del canal de radio es una función del tiempo (t) debido al movimiento del usuario y de τ , que denota retrasos de los múltiples trayectos para un valor fijo de t . La respuesta al impulso banda base de un canal multitrayecto se puede escribir de la siguiente manera (Proakis & Manolakis, 2007).

$$h(t, \tau) = \sum_{\ell=1}^P \alpha_{\ell}(t) \exp[-j\phi_{\ell}(t)] \delta[t - \tau_{\ell}(t)]$$

(Ecuación 4)

En donde P es el número total de múltiples trayectos, $\alpha_{\ell}(t)$, $\phi_{\ell}(t)$ y $\tau_{\ell}(t)$ denotan la amplitud, la fase y el retardo del ℓ -ésimo trayecto durante un instante de tiempo t y $\delta(t)$ es la delta de Dirac. En la figura 3 se puede observar un ejemplo de respuesta al impulso del canal de radio.

Dentro de un escenario NLOS, se puede ver que la señal recibida se encuentra compuesta por distintos componentes reflejados de la señal que es transmitida, de entre estos componentes ninguno de ellos es dominante. A partir del proceso gaussiano complejo de media cero se puede modelar la respuesta al impulso del

canal. La envolvente del proceso ($\alpha = |h(t, \tau)|$) se conoce como desvanecimiento, lo cual para un tiempo t determinado puede modelarse mediante una distribución Rayleigh cuando no existe línea de vista entre el transmisor y el receptor, en donde su función de densidad de probabilidad (PDF) es la siguiente (Jakes, 1974)

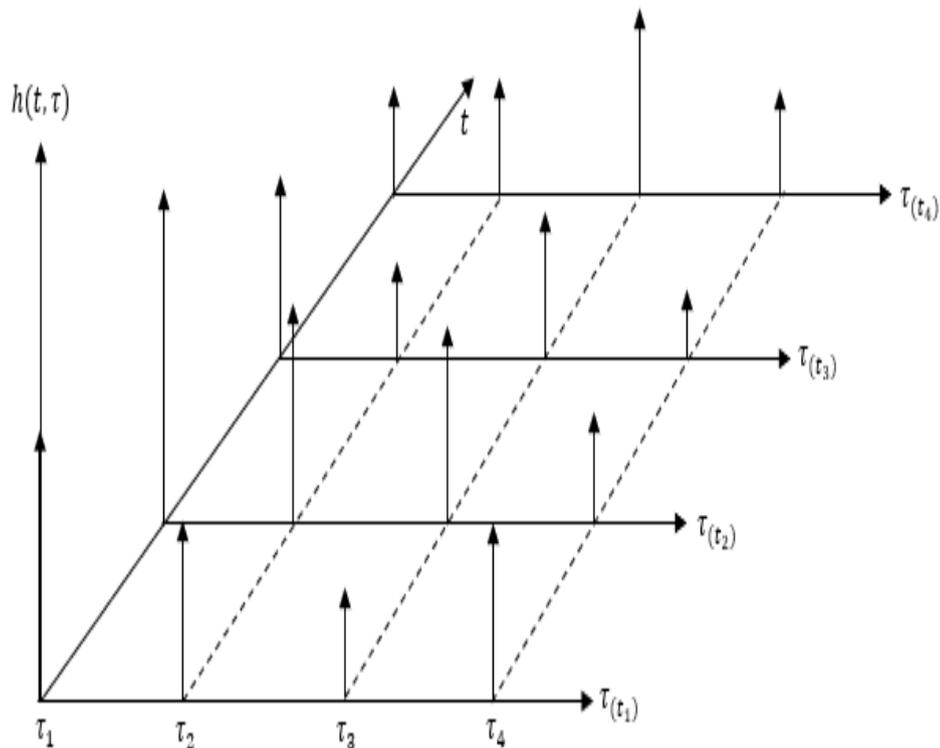


Figura 3. Respuesta de impulso del canal de radio.

Adaptado de (Carvajal, 2018).

$$f(\alpha) = \frac{\alpha}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right), \alpha \geq 0,$$

(Ecuación 5)

dónde σ^2 es la varianza de las variables aleatorias gaussianas reales con media cero que generan la variable aleatoria tipo Rayleigh y la fase resultante de este proceso es una variable aleatoria distribuida uniformemente en el intervalo

$[0, 2\pi)$.

Por otra parte, cuando existe línea de vista (LOS) entre el transmisor y el receptor, la fluctuación de la señal producida por el canal inalámbrico se modela como una variable aleatoria de tipo Rice, cuya función de densidad de probabilidad (PDF) está dada de la siguiente forma (Jakes, 1974).

$$f(\alpha) = \frac{\alpha}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\alpha^2 + U^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{U\alpha}{\sigma^2}\right), U \geq 0, \alpha \geq 0,$$

(Ecuación 6)

dónde el parámetro U representa el valor medio de la señal determinística (línea de vista) y el parámetro $I_0\left(\frac{U\alpha}{\sigma^2}\right)$ es la función modificada de Bessel de primer tipo y de orden cero (Rappaport, 1996).

1.2.2.2 Parámetros de canales con múltiples trayectorias

Al momento de realizar una comparación entre los diferentes canales de radio y diseñar sistemas celulares, hay que tener en cuenta algunos parámetros que van a proporcionar información sobre las características del canal. Dichos parámetros son la dispersión temporal y el ancho de banda de coherencia del canal, estos parámetros tienen como objetivo describir la naturaleza dispersiva de un canal para un instante de tiempo t .

- **Dispersión temporal**, este parámetro se obtiene del comportamiento de la potencia recibida a lo largo de un intervalo de tiempo, el cual viene dado por una diferencia de tiempo entre la primera y última versión de la señal recibida por el receptor, en consecuencia, la dispersión temporal es capaz de proporcionar una métrica de duración de la respuesta al impulso del canal. En el caso de entornos urbanos, este parámetro tiene un intervalo de valores que van desde $700 \text{ ns} \leq T \leq 1900 \text{ ns}$ (Rappaport, 1996).
- **Ancho de banda de coherencia de canal**, B_c , es considerada como una

medida estadística del intervalo de frecuencia en donde existe una alta correlación por parte del desvanecimiento. Si dos señales son separadas un intervalo de frecuencia mayor a B_c entonces estas serán afectadas de manera diferente por el canal, esto quiere decir que serán afectadas por desvanecimientos independientes. Si la correlación de desvanecimiento es superior a 0.5, B_c está dado aproximadamente por B_c (Rappaport, 1996)

$$B_c \approx \frac{1}{5\tau}$$

(Ecuación 7)

1.3 Diversidad

La diversidad permite reducir la afectación del desvanecimiento en las señales transmitidas. Esto se logra debido al hecho de que la recepción de varias señales afectadas por desvanecimientos aleatorios e independientes entre si, disminuyen la probabilidad de que todas las señales se degraden en la misma medida, permitiendo que la recuperación en la recepción sea menos complicada. Es así que, el principio de diversidad consiste en obtener varias versiones de la señal las mismas que son afectadas por desvanecimientos independientes. A continuación, se describen algunas técnicas de diversidad (Carvajal, Bit Error Rate and Spectral Efficiency Evaluation of MC-CDMA Cellular Systems Employing Multiuser Detection, 2018).

1.3.1 Diversidad en Frecuencia.

En este tipo de diversidad la información se transmite en diferentes frecuencias portadoras. Los desvanecimientos independientes se consiguen separando la frecuencia central de los canales con un ancho de banda superior al de la banda de coherencia del canal. La mayor desventaja que tiene esta técnica radica en que se necesita un incremento en el ancho de banda, lo que produce un deficiente uso del espectro. Sin embargo, se admite el empleo de esta técnica en escenarios que requieren elevada confiabilidad de operación (Proakis & Manolakis, 2007).

1.3.2 Diversidad Temporal

En la diversidad temporal la misma información es transmitida en diferentes instantes de tiempo. Además, con el objetivo de mantener el principio de diversidad (desvanecimientos independientes) los tiempos de separación entre las señales transmitidas deben ser superiores al tiempo de coherencia del canal. Esto, produce un decremento en el aprovechamiento del espectro, es decir, una deficiencia espectral al igual que en la diversidad de frecuencia, pero una mejora en el desempeño (Carvajal, Bit Error Rate and Spectral Efficiency Evaluation of MC-CDMA Cellular Systems Employing Multiuser Detection, 2018).

1.3.3 Diversidad Espacial de la Señal (SSD, del inglés *Signal Space Diversity*)

SSD es una técnica propuesta en (Boutros & Viterb, 1998) con el objetivo de suplir las falencias de las dos técnicas expuestas anteriormente. Es decir, obtener una diversidad sin pérdida de eficiencia espectral. Esto se consigue, rotando una constelación multidimensional QAM de forma que los puntos de la constelación no tengan coincidencia en ninguna de sus componentes. Adicionalmente, el número mínimo de componentes distintos entre dos puntos de la constelación se denomina orden de la diversidad. En otros términos, la distancia mínima de *Hamming* entre dos vectores de coordenadas se denomina orden de la diversidad. Al obtener una constelación correctamente girada cuyo número de dimensiones es igual a D , entonces, el máximo orden de diversidad que se puede alcanzar es de D .

En la figura 4 se observan dos constelaciones 4-QAM, la primera sin giro y la segunda girada usando SSD. Observe que, si el desvanecimiento actúa en una de las componentes de la constelación entonces, por el criterio de distancia mínima, la detección en la constelación sin girar comete un error en la detección, lo que no ocurre cuando la constelación esta rotada. Por lo tanto, la técnica SSD necesita garantizar una afectación por desvanecimientos independientes para

las componentes en fase y cuadratura del símbolo recibido.

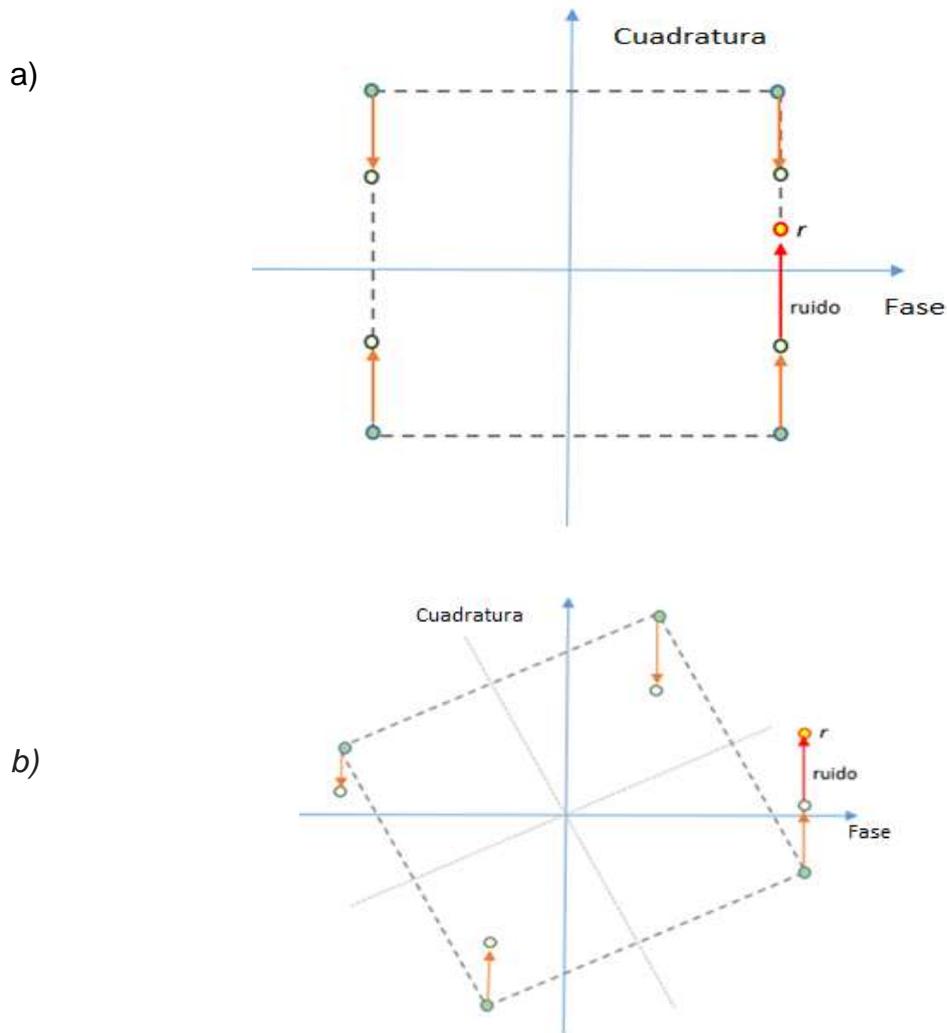


Figura 4. Constelación de una modulación 4-QAM.

Adaptado de (Carvajal, 2018).

- a) Constelación sin girar
- b) Constelación girada

En la parte del transmisor, a un símbolo con modulación QAM D -dimensional y codificación de Gray, se le asigna un conjunto de bits. Por otro lado, una modulación bidimensional M -QAM transmitida a través de cada slot de tiempo tiene orden $M = 2^{2m/D}$ y tiene una potencia media. Para obtener el vector r del símbolo rotado $D \times D$ se aplica la matriz de rotación W , por lo tanto, $r = W^T s$. De esta manera se consigue la rotación de la constelación sin haber modificado la

potencia de transmisión, ya que las matrices son ortogonales. Además, las matrices de rotación obtenidas tienen unos parámetros λ los cuales al ir variando aseguran la diversidad del sistema. Sumado a esto, se tiene que en (Boutros & Viterb, 1998) y (Bayer-Fluckige, 2004), se determina que en algunas matrices de rotación se asegura la diversidad de orden D, pero adicionalmente algunas permiten que el sistema tenga un mejor desempeño términos de relación señal/ruido (SNR). Esto se produce en las matrices que maximizan la distancia producto mínima del producto entre dos símbolos multidimensionales de la constelación girada. Es por lo que, la variable λ debe ser parametrizada tomando en cuenta este particular.

$$\begin{aligned} \overline{s^2} &= \frac{2\sqrt{M}}{M} s_{\sqrt{M}-ASK}^2 \\ &= \frac{2}{3}(M-1)A^2 \end{aligned}$$

(Ecuación 8)

Las matrices que producen el mejor desempeño son las que maximizan la distancia producto mínima entre dos símbolos multidimensionales de la constelación girada. Por lo tanto, los parámetros λ también deben seleccionarse considerando este criterio.

Las matrices de rotación usadas para D=2, 3, 4 y 6 dimensiones se muestran en la tabla 1.

Dentro de la tabla 1, los parámetros a, b se encuentran representados con la variable λ y cuyos valores se seleccionan con el motivo de obtener una diversidad de orden D.

Tabla 1.

Matrices de rotación empleadas con la técnica SSD

D	Matriz de rotación, W	Parámetros
-----	-------------------------	------------

2	$\begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix}$	$a = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda_2^2}}, b = \lambda_2 a$
3	$\begin{pmatrix} a & b & c \\ b & c & a \\ -c & -a & -b \end{pmatrix}$	$a = \frac{1 + \lambda_3}{1 + \lambda_3 + \lambda_3^2}, b = \lambda_3 a, \quad c = \frac{-\lambda_3}{1 + \lambda_3} a$
4	$\begin{pmatrix} a & b & -c & -d \\ -b & a & d & -c \\ c & d & a & b \\ -d & c & -b & a \end{pmatrix}$	$a = \frac{1}{u\sqrt{1 + \lambda_2^2}}, b = \frac{\lambda_2}{u\sqrt{1 + \lambda_2^2}}, c = \frac{\lambda_4}{u\lambda_2}, d = \frac{\lambda_4}{u}$ $u = \frac{\sqrt{\lambda_2^2 + \lambda_4^4 + \lambda_2\lambda_4^2}}{\lambda_2}$
6	$\begin{pmatrix} a & b & c & -x & -y & -z \\ b & c & a & -y & -z & -x \\ -c & -a & -b & z & x & y \\ x & y & z & a & b & c \\ y & z & x & b & c & a \\ -z & -x & -y & -c & -a & -b \end{pmatrix}$	$\dot{a} = \frac{1 + \lambda_3}{1 + \lambda_3 + \lambda_3^2}, \dot{b} = \lambda_3 \dot{a}, \dot{c} = \frac{-\lambda_3}{1 + \lambda_3} \dot{a}$ $\dot{x} = \lambda_6 \dot{y}$ $= \frac{\dot{b} - \dot{a} - \sqrt{(\dot{b} - \dot{a})^2 + (\dot{a} - \dot{c})(\dot{b} - \dot{c})}}{\dot{a} - \dot{c}} \dot{x}, \dot{z}$ $= \frac{-\dot{x}\dot{y}}{\dot{x} + \dot{y}}$ $u = \sqrt{\dot{a}^2 + \dot{b}^2 + \dot{c}^2 + \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}$ $a = \frac{\dot{a}}{u}, b = \frac{\dot{b}}{u}, c = \frac{\dot{c}}{u}, x = \frac{\dot{x}}{u}, y = \frac{\dot{y}}{u}, z = \frac{\dot{z}}{u}$

Adaptado de (Carvajal, Bit Error Rate and Spectral Efficiency Evaluation of MC-CDMA Cellular Systems Employing Multiuser Detection, 2018).

Se ha empleado $\lambda_2, \lambda_3, \text{etc.}$, para seguir una notación similar a la de (Boutros & Viterb, 1998) y el procedimiento para la creación de estas matrices se describe de igual manera en (Boutros & Viterb, 1998). Cabe mencionar que para que los valores de los parámetros sean óptimos, estos dependerán de la modulación empleada. En el caso de (Boutros & Viterb, 1998), los vectores de símbolos se

encuentran representados por vectores de fila, pero para este trabajo se ha decidido considerar a los vectores de símbolos como vectores de columna y por tal motivo se ha empleado la transposición de W

1.4 Técnicas de Acceso Múltiple

La transmisión o recepción de señales de diferentes usuarios que utilizan el mismo recurso de radio o canal, se denominan técnicas de acceso múltiple. Es así que, el medio por el cuál es transmitida la información se divide en canales para ser asignados eficientemente a diferentes usuarios. En este sentido, a continuación, se detallan algunas técnicas de acceso múltiple, usadas en el presente trabajo.

1.4.1 Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales.

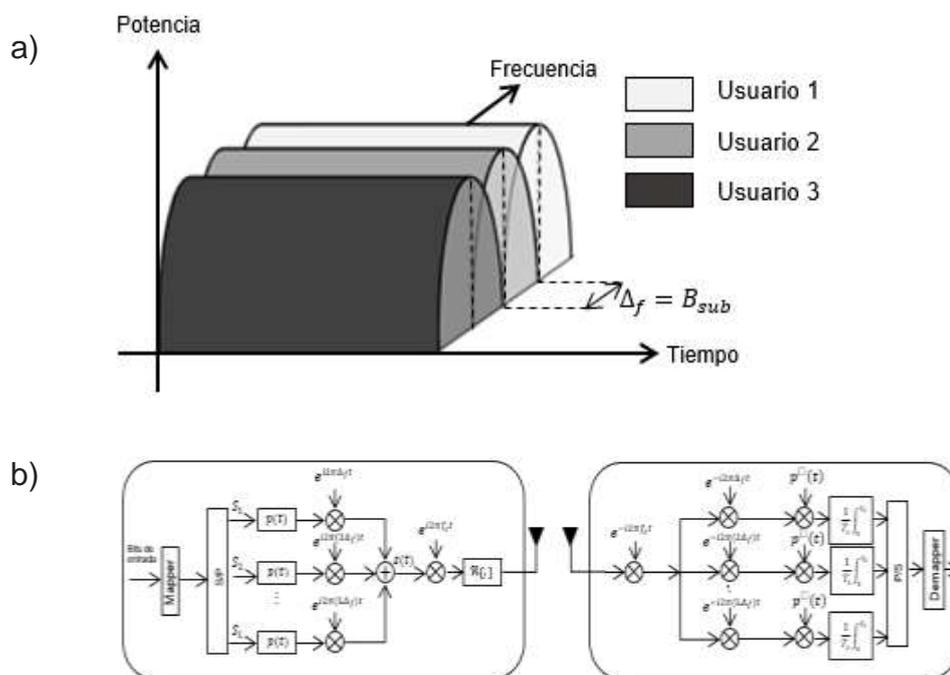


Figura 5. OFDMA: asignación de recursos y diagrama de bloques del sistema. Adaptado de (Carvajal, 2018).

a) Asignación de recursos en OFDMA

b) Diagrama de bloques del sistema OFDMA (implementación analógica)

OFDMA usa el principio de la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) (Saltzberg, 1967) y (Chang & Gibby, 1968) en la cual los símbolos se transmiten en subportadoras ortogonales entre sí para ser transmitidos en paralelo. En consecuencia, en un sistema celular se obtiene el acceso múltiple en virtud de la asignación de una o más subportadoras para cada usuario que transmite.

La figura 4 muestra la asignación de recursos y el diagrama de bloques de los sistemas OFDMA. 4(a) muestra los pulsos rectangulares de banda base con un ancho de banda $B_{sub}=\Delta_f$ y donde se puede demostrar que la correlación cruzada entre dos señales de banda de paso que están moduladas por sinusoides y las cuales tienen un espaciado de frecuencia cero, son señales ortogonales. 4(b) muestra el diagrama de bloques del sistema OFDMA con una implementación analógica, en donde S/P y P/S denotan convertidores serie/paralelo y paralelo/serie, respectivamente.

Con OFDM L símbolos son modulados en L subportadoras con un espaciado (separación) de frecuencia entre subportadoras contiguas definidos por la siguiente relación.

$$\Delta_f = \frac{1}{T_s}$$

(Ecuación 9)

dónde T_s es la duración del símbolo y Δ_f es igual al ancho de banda B_{sub}

La función que define el símbolo transmitido de OFDM está dada por la ecuación 10

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{\ell=1}^L s_{\ell} \exp(i2\pi\ell\Delta_f t) p(t), \quad 0 \leq t \leq T_s$$

(Ecuación 10)

dónde $p(t)$ es el pulso rectangular de la banda base y s_{ℓ} es el símbolo ℓ -th complejo modulado en la subportadora ℓ -th, se dice que es una señal exponencial

ya que la sucesión de los valores forma una progresión geométrica dada por los valores que toma ($i2\pi\Delta_f t$).

1.4.1.1 Implementación Digital

Utilizando la transformada discreta inversa de Fourier (IDFT) y la transformada discreta de Fourier (DFT), se consigue la modulación y desmodulación en el dominio del tiempo para OFDMA. Dichas operaciones es posible realizarlas con el apoyo de algoritmos eficientes. En particular, la DFT se implementa a través de la transformación rápida de Fourier (FFT) y la IDFT se implementa a través IFFT. Al implementar un transmisor digital OFDM, los símbolos complejos se paralelizan en grupos de símbolos. Entonces, se obtiene la IFFT de esos símbolos. Posteriormente, las muestras discretas resultantes ingresan a un convertidor, seguidamente, las muestras pasan por un filtro dando como resultado la señal en banda base. Finalmente, se inserta la frecuencia portadora y se transmite la señal OFDM modulada. En el lado del receptor, las señales recibidas primero se demodulan, a continuación, la señal resultante obtenida pasa a través de un filtro con una frecuencia de muestreo. Luego, las muestras ingresan a un convertidor y se obtiene la FFT de sus salidas. Por último, las salidas FFT ingresan a un detector y la decisión del símbolo se realiza en el demapper (Barry, 2004).

1.4.1.2 Canal de Guarda y Prefijo cíclico

Como el ancho de banda de coherencia del canal es típicamente menor que el ancho de banda total del sistema, la interferencia Intersimbólica (ISI) e interferencia entre portadoras aparecen en escena en un sistema OFDMA. Con la finalidad de eliminar sus efectos, resulta necesario la utilización de un intervalo de guarda entre transmisores de símbolos adyacentes. La duración del intervalo de guarda (T_p) debe satisfacer $T_p > T$, donde T es la dispersión temporal del canal. Este intervalo de guarda se debe completar con una extensión cíclica de cada símbolo. Esta extensión está formada por muestras y se conoce como

prefijo cíclico. En la figura 1.5 se puede observar la incorporación del prefijo cíclico en el intervalo de guarda, en la cual se realiza una copia de la primera parte del símbolo transmitido y se la coloca en el intervalo de guarda permitiendo eliminar la interferencia Inter simbólica que afecta a la transmisión. (Oppenheim & Schafer, 1999).

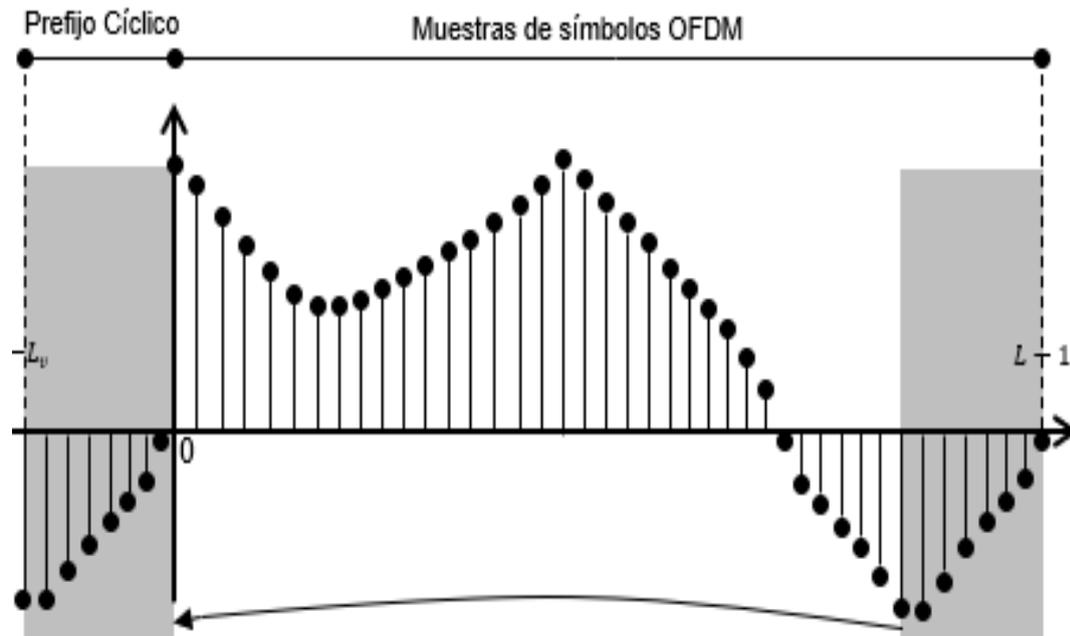


Figura 6. Inserción de prefijo cíclico.

Adaptado de (Carvajal, 2018)

Esto da como consecuencia un aumento del ancho de banda y de la potencia de transmisión empleada. Es así como, el factor de incremento de ancho de banda y de la potencia requerida se pueden definir como:

$$\rho = 1 + \frac{L_P}{L}$$

(Ecuación 11)

Dónde L_P es el número de muestras empleadas para el prefijo cíclico y L es el total de subportadoras en el sistema. De esta manera el ancho de banda

requerido pasa de ser B a $B \rho$ y la potencia necesaria se incrementa en igual proporción, es decir P_t a $P_t \rho$.

1.4.2 Acceso Múltiple por Códigos Esparcos (SCMA)

SCMA es una técnica de acceso no ortogonal basada en la generación de códigos (codeBook) para diferentes usuarios. SCMA está dentro de las opciones para ser utilizada como una técnica de acceso múltiple en las futuras redes de telefonía celular 5G. En esencia, esta técnica realiza la etapa de modulación y ensanchamiento de la señal, a través de secuencias de código esparso de manera conjunta. Por ende, los bits son asignados directamente a secuencias de esparsos multidimensional, llamadas palabras de código (codeWords). Después, estas secuencias de ensanchamiento son moduladas en subportadoras OFDM. En la figura 6 se puede observar el diagrama de bloques de un transmisor SCMA, en el cual la etapa de mapeo en secuencias de código contempla dos bits por símbolo con una modulación QAM, después se tiene la aplicación de la técnica SSD con la cual se realiza la rotación de la constelación y por último el mapeo de información de acuerdo con la técnica de dispersión *Low Density Signature* (LDS) (Frison, 2019).

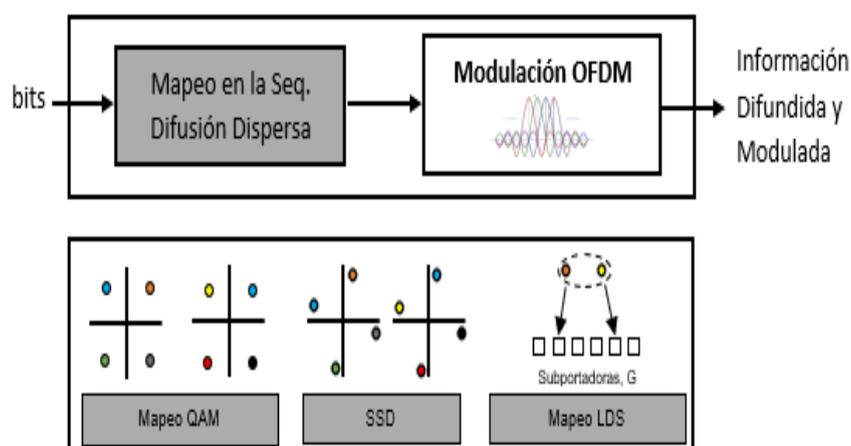


Figura 7. Diagrama de bloques del transmisor SCMA.

Adaptado de (Frison, 2019).

En (Gallage, 1962) fue presentada una propuesta en la que se sugiere utilizar secuencias de dispersión de baja densidad, lo que implica la utilización de un detector multiusuario con una complejidad baja. Además, para disminuir la interferencia dentro de la célula y, en consecuencia, para aumentar el factor de carga de la red, no se emplean todos los chips de la secuencia (Hoshyar, Watha, & Tafazolli, 2008). Esto se consigue cuando algunos chips de la secuencia de ensanchamiento son cero. Es decir, utilizando la técnica de secuencias de ensanchamiento (LDS), que se basa en las matrices de verificación de paridad dispersa utilizadas por los códigos de verificación de paridad de baja densidad (LDPC). Estos códigos se subdividen en códigos de bloque correctores de errores lineales, que aporta un matriz de verificación de paridad dispersa, es decir, que contiene pocos elementos no nulos (Gallage, 1962).

El empleo de SCMA sustituye los procesos de modulación y dispersión espectral por el mapeo de los bits directamente en el conjunto de secuencias de ensanchamiento multidimensional compleja. Esto provoca una relación señal / ruido favorable para constelaciones multidimensionales, dando como resultado un sistema tolerante a sobrecargas ($\beta > 100\%$) con una complejidad de detección aceptable. La sobrecarga implica que el número de usuarios es mayor que el número de subportadoras del sistema.

1.5 Técnicas de Detección

Las técnicas de detención pueden ser divididas en base al número de usuarios, es así como, existe la técnica de usuario único (*single user*) y la detección multiusuario (*multiuser*). En el usuario único, las señales recibidas en el receptor se procesan de forma independiente, mientras que, la de los otros usuarios se asumen como interferencia MAI. La detección de un usuario es óptima cuando no hay más usuarios transmitiendo, es decir la MAI es nula. Por el contrario, en la detección multiusuario, se procesa toda la información de manera conjunta, lo que permite un mejor desempeño en términos de tasa de error de bits promedio cuando existe presencia de MAI (Castoldi, 2002). Existen varias técnicas de

detección multiusuario que difieren en la complejidad del detector y en su desempeño como por ejemplo la cancelación sucesiva de interferencia (SIC) o cancelación paralela en el detector o el algoritmo de Intercambio de Mensajes (MPA). En este caso y para este proyecto se toma en cuenta el este último, que es el receptor utilizado en los sistemas SCMA.

1.5.1 Algoritmo de Intercambio de (MPA)

El algoritmo de intercambio de mensajes realiza un proceso de intercambio de mensajes entre los nodos de función y los nodos de variables que están interconectados por sus correspondientes ramas. Estos mensajes comprenden una serie de probabilidades extrínsecas, las mismas que, representan la confiabilidad de los símbolos asociados a cada rama. El mensaje enviado a un nodo en particular a través de una rama no puede depender del mensaje recibido previamente por esa rama. La figura 7 se esquematiza la transferencia de mensajes entre el nodo de función 2 y el nodo variable C_1 , el mismo que depende de la información recibida desde el nodo variable C_3 de la iteración anterior (Burg, 2005).

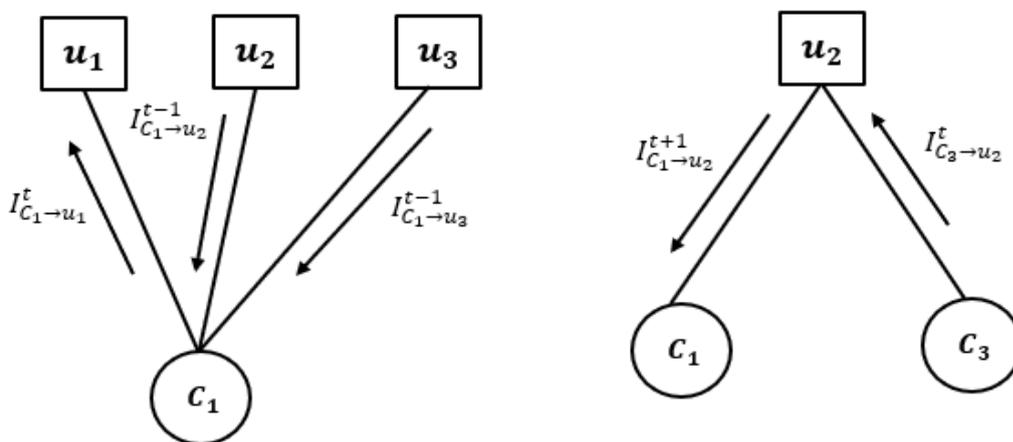


Figura 8. Intercambio de mensajes entre nodos de función y nodos variables.

Adaptado de (Frison, 2019)

El funcionamiento del MPA esta esquematizado en la figura 7. El mensaje

reenviado desde el nodo de función C_n al nodo variable U_k se representará matemáticamente como $I_{C_n \rightarrow U_k}^t$, donde t es la t -ésima iteración del proceso de detección. Del mismo modo, el mensaje reenviado desde el nodo variable U_k al nodo de función C_n estará representado por $I_{C_n \leftarrow U_k}^t$. La rama que conecta el nodo variable al nodo de función está representada por $e_{k,n}$. En este sentido, basado en la definición de probabilidad extrínseca, el mensaje $I_{C_n \leftarrow U_k}^t$, que se reenviará a través de la rama $e_{k,n}$, será la combinación de los mensajes recibidos en la iteración anterior por las ramas $e_{n,l}, \forall l \in \zeta_n$ (conjunto de elementos no nulos de la matriz de mapeo), es decir, por todas las ramas que conectan el nodo de función C_n excepto la rama que une al k -ésimo nodo variable.

El MPA es posible utilizarlo en la detección multiusuario conjunta, produciendo una reducida complejidad en comparación con el detector multiusuario de máxima verosimilitud (ML) que es el detector óptimo.

La detección multiusuario MPA (*Maximum A-Posteriori*) detecta la secuencia de símbolos \mathbf{x} aumentando la probabilidad conjunta del vector de símbolos transmitidos.

$$\tilde{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{a} \in M^K} P(\hat{\mathbf{x}}|\mathbf{y})$$

(Ecuación 12)

dónde \mathbf{y} es el vector recibido, \mathbf{x} es el vector de los posibles símbolos transmitidos. M^K es el orden del arreglo usado para representar la información de los K usuarios.

El vector encontrado es \mathbf{x} . entonces el símbolo detectado x_k está dado por:

$$\tilde{x}_k = \arg \max_{a \in M} \sum_{\hat{\mathbf{x}} \in M^K} P(\hat{\mathbf{x}}|\mathbf{y})$$

(Ecuación 13)

En consecuencia y aplicando el teorema de Bayes (Andrews, 2007).

$$P(\hat{\mathbf{x}}|\mathbf{y}) = \frac{P(\mathbf{y}|\hat{\mathbf{x}})P(\hat{\mathbf{x}})}{P(\mathbf{y})}$$

(Ecuación 14)

dónde $P(\hat{\mathbf{x}}) = \prod_{k=1}^K P(\hat{x}_k)$ Es la probabilidad conjunta de todos los símbolos \hat{x}_k . Tomado en cuenta que el ruido sea independiente e idénticamente distribuido y no contempla una correlación con los símbolos transmitidos, se asume que:

$$P(\mathbf{y}|\hat{\mathbf{x}}) = \prod_{n=1}^G P(y_n|\hat{\mathbf{x}}),$$

(Ecuación 15)

dónde $P(y_n|\hat{\mathbf{x}})$ Es la muestra recibida correspondiente al n -ésimo chip.

Como los usuarios propagan su información en el mismo chip, se puede simplificar la expresión anterior (ecuación 15) obteniendo como resultado la ecuación 16.

$$P(y_n|\hat{\mathbf{x}}) = P(y_n|\hat{\mathbf{x}}^{[n]})$$

(Ecuación 16)

dónde $\hat{\mathbf{x}}^{[n]}$ es el vector de símbolos transmitidos por todos los usuarios que transmitieron la señal en el n -ésimo chip. Entonces, tomando las ecuaciones anteriores 15 y 16 se obtiene:

$$\tilde{x}_k = \arg \max_{a \in M} \sum_{\hat{\mathbf{x}} \in M^K} P(\hat{\mathbf{x}}) \prod_{n \in \zeta_k} P(y_n|\hat{\mathbf{x}}^{[n]})$$

(Ecuación 17)

En base a la muestra recibida en el n -ésimo chip y_n la probabilidad el nodo de función está definido por:

$$P(y_n | \hat{\mathbf{x}}^{[n]}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|y_n - \mathbf{h}^{[n]T} \hat{\mathbf{x}}^{[n]}\|^2\right)$$

(Ecuación 18)

dónde σ^2 es la varianza del ruido y $\mathbf{h}^{[n]}$ es el n vector del desvanecimiento en el n-ésimo chip.

Para realizar la detección, este algoritmo realiza el proceso en tres pasos definidos a continuación.

I. **Inicialización:** este paso va relacionado con los mensajes iniciales de los nodos variables antes de iniciar el proceso iterativo, es decir, cuando $t = 0$, son:

$$I_{c_n \leftarrow u_k}^0(x_k) = \frac{1}{K}$$

(Ecuación 19)

II. **Paso iterativo:** cuando el algoritmo empieza esta etapa, los mensajes de los nodos variables y nodos de función se actualizan con cada iteración, esto se repite I_T veces, las mismas que son definidas con anterioridad.

$$I_{c_n \rightarrow u_k}^t(x_k) = \sum [P(y_n | \hat{\mathbf{x}}^{[n]}) \prod I_{c_l \leftarrow u_m}^{t-1}(x_m)]$$

(Ecuación 20)

Actualización de los nodos de función

$$I_{c_n \rightarrow u_k}^t(x_k) = \lambda_k [\prod I_{c_l \leftarrow u_k}^{t-1}(x_k)]$$

(Ecuación 21)

Actualización de los nodos variables.

dónde λ^2 se establece en con la condición de que $\sum_k P(x_k) = 1$

III. **Detección:** es la etapa final después de terminar el número de iteraciones establecidas, es así que, el algoritmo realiza la detección de los símbolos de K usuarios mediante la aplicación de la ecuación 21

$$\tilde{x}_k = \arg \max_{\hat{x}_k} \prod_{n \in \zeta_k} I_{c_n \rightarrow u_k}^{I_T}(\hat{x}_k)$$

(Ecuación 22)

Una particularidad de este algoritmo es que para realizar la comprobación de paridad debe terminar con todas las iteraciones, a diferencia del LDPC que lo hace en cada iteración, y si cumple finaliza la búsqueda (Moon, 2005).

2 CAPÍTULO II. DESEMPEÑO DEL SISTEMA SCMA EN CANALES CON DESVANECIMIENTO DE TIPO RICE

Introducción

En este capítulo se explica y analiza un entorno SCMA unicelular, SCMA pertenece a las denominadas técnicas NOMA. Este tipo de tecnologías resulta ser una de las más populares para ser utilizada como técnica de acceso múltiple para la quinta generación (5G) de sistemas móviles (HUAWEI, 2015).

En SCMA, el mapeo de bits en símbolos se realiza mediante secuencias de ensanchamiento dispersas en conjunto. Por lo cual, los bits son asignados de forma directa a secuencias de propagación multidimensionales, las cuales son denominadas como *CodeWords*, las cuales forman parte de un conjunto de secuencias de ensanchamiento predeterminados conocidos como *CodeBooks*. Las *CodeWords* de distintos usuarios se superponen de forma no ortogonal y dispersa, permitiendo que exista de esta manera una sobrecarga del sistema y

a su vez una reducción de la interferencia co-canal (Wu, Wang, Chen, & Bayesteh, 2017), (Cai, Fan, Lei, Liu, & Chen, 2016).

Para una mejor comprensión del funcionamiento de la técnica SCMA en canales de tipo Rice, se describirá en la sección 2.2 la forma en la que se realiza la simulación del canal con desvanecimiento Rice en Matlab, dentro de la sección 2.3 se describe la estructura del transmisor SCMA implementada en Matlab, la sección 2.4 se explica la implementación del receptor SCMA en Matlab. Finalmente, la sección 2.5 se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones de SCMA operando en entornos uncelulares.

2.1 Simulación del Canal con Desvanecimiento de Tipo Rice en Matlab

Para evaluar canales inalámbricos que no tienen uniformidad de potencia de tipo desvanecimiento plano o no selectivo en frecuencia, es idóneo emplear procesos estocásticos descritos a través de una función de densidad de probabilidad (PDF) o una función de distribución acumulativa (CDF). Consecuentemente, el desvanecimiento instantáneo que afecta a la señal transmitida por el canal inalámbrico es representado por una variable aleatoria. Cuando en un enlace entre dos estaciones existen múltiples trayectos y además una componente de la señal es que predominante, es decir, existe línea de vista entre las dos estaciones, se considera que el desvanecimiento sigue una distribución de tipo Rice (Carvajal, Bit Error Rate and Spectral Efficiency Evaluation of MC-CDMA Cellular Systems Employing Multiuser Detection, 2018). La PDF Riceana está dada por la siguiente expresión.

$$P(\alpha) = \left\{ \frac{\alpha}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\alpha^2 + U^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{U\alpha}{\sigma^2}\right) \right\} \quad U \geq 0, \alpha \geq 0$$

(Ecuación 23)

dónde σ^2 La varianza de las componentes Gaussiana que forman a ganancia del

canal y cuya envolvente tiene distribución de tipo Rice. U Es el valor medio de la componente determinística de la señal recibida. $I_0(.)$ Es la función de Bessel modificada del primer tipo de orden 0.

Por lo general en la literatura, el desvanecimiento de tipo Rice se define usando

$$K = \frac{U^2}{2\sigma^2}$$

(Ecuación 24)

Para simular una variable aleatoria de tipo Rice se crea una variable aleatoria compleja, dónde las componentes en cuadratura son variables aleatorias Gaussianas con varianza σ^2 . Una de las Gaussianas tiene media 0 y la otra tiene media U , esto es,

$$H = \sigma * g_1 + i(\sigma * g_2 + U)$$

(Ecuación 25)

dónde g_1 y g_2 son variables aleatorias gaussianas independientes y que pueden ser generadas usando la función `rand` en el software matlab. σ , es la varianza de cada variable aleatoria.

Para efectos de simulación, se debe crear una matriz con S filas y N_u columnas, donde S representa el número de subportadoras usadas en el sistema SCMA y N_u es el número de usuarios transmitiendo simultáneamente en el sistema.

En Matlab, la función `rand` puede ser usada para generar matrices de variables aleatorias. Para esto se usa:

`rand(N,M)`

Devuelve una matriz de $N \times M$ de números aleatorios donde N indica el número de filas y M el número de columnas. Por ejemplo, $rand(3,2)$ genera una matriz de dimensiones 3×2 .

2.2 Transmisor SCMA en Matlab.

La técnica SCMA utiliza un sistema OFDMA para transmitir las señales codificadas. Además, una de las partes esenciales de esta técnica es girar la constelación de la modulación utilizada con la finalidad de obtener los símbolos con diferentes potencias y fase para cada usuario, de esta manera se consiguen distintas secuencias de transmisión (*Codebook*).

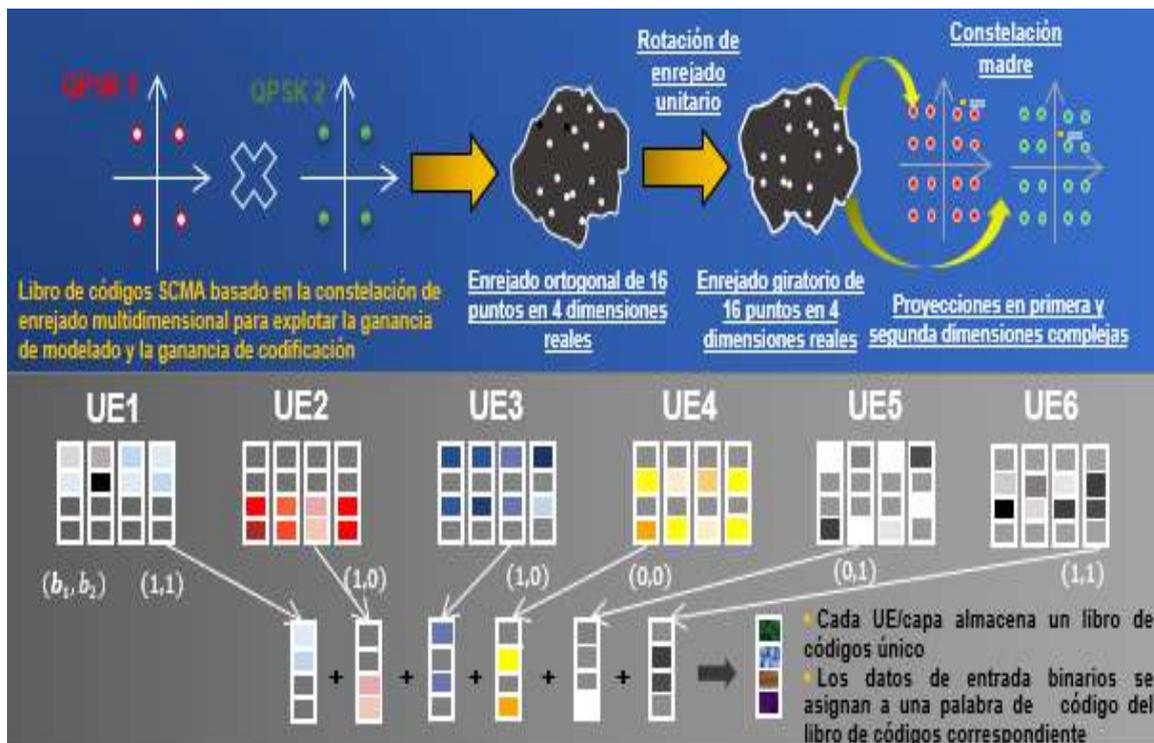


Figura 9: Sistema SCMA.

Adaptado de (Taherzadeh, Nikopour, bayesteh, & Baligh, 2014).

En la figura 8 se observa un sistema SCMA el cual tiene un enfoque metódico que se basa en constelaciones de enrejado multidimensional para la formación de *Codebooks*. Además, dichas constelaciones se encuentran rotadas en fase.

Al tener ya diseñada una constelación madre se puede crear varios *Codebooks* dependiendo del giro de dicha constelación. Después, los datos de entrada binarios de cada equipo de usuario (UE) van a ser asignados a una *Codeword* el cual es diferente para cada UE y que pertenecen al *Codebook* correspondiente. Por último, cabe mencionar que al ser SCMA no ortogonal la suma de cada secuencia de los diferentes UE van a ser distintas y se transmitirán en diferentes portadoras, permitiendo que existan una mejor cancelación de interferencia (Yang, y otros, 2016).

A continuación, se presenta el código utilizado en la simulación, el cual esta comentado a fin de entender el proceso de transmisión.

%% Parámetros del canal

```
Desv_pad_Fad = 1/sqrt(2); % Normaliza la potencia del desvanecimiento
```

```
%% Parámetros calculados
```

```
Eb_No = 10^(Eb_No_dB/10); % Desviación estándar del ruido,  
normalizo la potencia de desvanecimiento
```

```
Es_No = log2(M)*Eb_No; % Energía de símbolo
```

```
Desv_pad_Ruido = sqrt(1/(2*Es_No)); % Desviación estándar del ruido, si  
modifico Es_No cambio la varianza del ruido, en la práctica se cambia la  
potencia de transmisión y la del ruido se mantiene constante
```

```
D = sqrt(3*Fr)*RaioExt; % Distancia entre dos co-células
```

```
Nt = Ni_per_cell*Co_Cells; % Número total de interferentes
```

%% Parámetros Establecidos

```
Desv_Pad_Fad = 1/sqrt(2);
```

```
if Fr == 1 % Establece el valor de la distancia (D) entre las células,  
a partir del factor de reuso como condicional
```

```
Omega = pi/6;
```

```
elseif Fr == 3
```

```
Omega = pi/3;
```

```
elseif Fr == 7
```

```

Omega = 4*pi/180;
end

%% Simulación
conta_erros = 0; loops = 0; aux = []; total_r_fad = 0; % Inicialización de las
variables conta_erros, loops, aux y total_r_fad
while conta_erros <= erros
%% Usuario en la célula central
% Transmissor
Bits_tx = round(rand(Nu,log2(M))); % Generación de bits de
transmisión de forma aleatoria
CodeWords_tx = SCMA_Encoder(Bits_tx,CB,Mapping); % Obtención de
las CodeWords de transmisión, a partir del codificador (Mapeo)

% Canal
H = Desv_pad_Fad*randn(K,Nu) + 1i*(Desv_pad_Fad * randn(K,Nu)+U); %
Desvanecimiento Rice
r_fad = sum(CodeWords_tx.*H,2); %ou r_fad = diag(CodeWords_tx.*Hc); %
Cálculo del desvanecimiento

%% Usuarios en las co-células

% Pérdidas de Trayecto y Control de Potencia para los interferentes
r_beta = zeros(1,Co_Cells); d_beta = zeros(1,Co_Cells); aux = 0;
r_fad_I = zeros(K,Co_Cells);

for kk = 1:Co_Cells
r = sqrt(rand(1,Ni_per_cell)*(RaioExt^2 - Ro^2) + Ro^2); % Distancia
de los usuarios hasta su estación radio-base
Theta = 2*pi*rand(1,Ni_per_cell); % Ángulo de cada
usuario en relación al eje x
d = zeros(1,Ni_per_cell);

```

```

for kkk = 1:Ni_per_cell
d(kkk) = sqrt(3*(RaioExt^2)*Fr + 2*RaioExt*sqrt(3*Fr).*r(kkk).*cos(Theta(kkk) -
Omega - (kk-1)*pi/3) + r(kkk).^2); % Distancia entre los usuarios de las
diferentes células
end
r_beta(kk) = r.^(Beta); % Control de potencia
d_beta(kk) = d.^(-Beta); % Pérdida de trayecto

Bits_tx_I = round(rand(Nu,log2(M))); % Generación de bits de
transmisión interferentes
CodeWords_tx_I = SCMA_Encoder(Bits_tx_I,CB,Mapping); % Generación
de CodeWords de transmisión interferentes

% Canal Interferente
H_I = Desv_pad_Fad*randn(K,Nu) + 1i*(Desv_pad_Fad * randn(K,Nu)+U); %
Desvanecimiento Rice
r_fad_I(:,kk) = sum(CodeWords_tx_I.*H_I,2); %ou r_fad =
diag(CodeWords_tx.'*Hc); % Cálculo del desvanecimiento interferente
end

for kk = 1:Co_Cells
r_fad_I_total = r_fad_I(:,kk).*sqrt(r_beta(kk) .* d_beta(kk)); % Cálculo del
desvanecimiento interferente total dentro de un loop a partir de las co-
células
end
R_fad_I = sum(r_fad_I_total,2); % Suma total del desvanecimiento
interferente

% Canal AWGN
Noise = Desv_pad_Ruido*(randn(K,1) + 1i*randn(K,1)); % Cálculo del ruido
gaussiano

```

```
y = r_fad + R_fad_I + Noise; % Suma del ruido gaussiano y
los desvanecimientos
```

```
% Receptor
```

```
LLR =
```

```
SCMA_Decoder_MPA(y,H,CB,T,Desv_pad_Ruido,Mapping,df,N,Steps,NIter);
```

```
% Obtención de la relación de probabilidad logarítmica
```

```
Bits_rx = sign(LLR); Bits_rx(Bits_rx == -1) = 0;
```

```
% Errores
```

```
conta_errores = conta_errores + sum(sum(Bits_tx ~= Bits_rx)) % Errores
```

```
obtenidos durante la simulación de SCMA con interferencia de co-células
```

```
loops = loops + 1
```

```
end
```

```
BER_Sim = conta_errores/(loops*log2(M)*Nu) % Cálculo del
```

```
BER (tasa de error de bit)
```

2.3 Receptor SCMA en Matlab

En la sección 1.5.1 se indicó que MPA es un algoritmo que permite realizar un proceso de intercambio de mensajes entre los nodos de función y los nodos de variables, los cuales se encuentran interconectados por sus respectivas ramas. A continuación, se presenta el código de MPA implementado en el software de Matlab basado en la ecuación 21

```
%% Decoder SCMA (Log-MPA Algorithm)
```

```
%% Parámetros calculados
```

```
V = size(CB, 3); % Número de usuarios (capas)
```

```
K = size(CB, 1); % Número de subportadoras (características ortogonales)
```

```
M = size(CB, 2); % Número de CodeWords en cada CodeBook
```

%% Parámetros establecidos

Prior_Prob_CodW = 1/M; **% Prior Probability para cada CodeWord. Se consideró que todos los CodeWords tenían la misma probabilidad**

%% Paso 1: Cálculo inicial de probabilidad condicional

f_n = zeros([M*ones(1,df) K]);

[fil,col] = size(Steps);

for kk = 1:K **% Loop mediante el número de subportadoras como condicional**

Users_Rec = find(T(kk,:) == 1); **% Usuarios que transmiten en el recurso k-th**

for kkk = 1:fil **% Loop mediante el número de filas como condicional**

acum = 0;

for kkkk = 1:col **% Loop mediante el número de columnas como condicional**

acum = acum +

CB(kk,Steps(kkk,kkkk),Users_Rec(kkkk))*Hc(kk,Users_Rec(kkkk)); **%**

Acumulador mediante la suma de Codebooks a partir del número de columnas

end

Position = num2cell([Steps(kkk,:),kk]); **% Para transformar el vector en una posición dentro de la matriz**

f_n(Position{:}) = -(1/(2*(Desv_pad_Noise)^2))*abs(y(kk) - acum)^2; **%**

Resultado del cálculo inicial de probabilidad condicional

end

end

%% Paso 2: Mensaje iterativo que pasa a lo largo de los bordes

lgv = zeros(K,V,M); **% Subportadoras x Users x NroCodeWords**

```

Ivg = log(Prior_Prob_CodW*ones(K,V,M)); % Inicialización de mensajes de
Ivg
for iter = 1:NIter          % Loop mediante el número de iteraciones
% Actualización de mensajes Igv (nodo de función a nodo variable) ->
(nodo de recurso para nodo variable)
for kk = 1:K % Generamos mensajes de cada nodo de función (nodos de
recursos)
Users_Rec = find(T(kk,:) == 1); % Usuarios que transmiten en el recurso kk-
th (Nodos variables que se conectan con el nodo de función kk-th)
Aux_Igv = zeros(1,M^(df-1)); % Variable auxiliar Igv
for Actual_VarNode = 1:df % Enviamos mensajes a cada nodo variable que
se conecta con el nodo de función kk-th
New_Steps = zeros(fil,col); conta = 2;
for kkk = 1:col
if kkk ~= Actual_VarNode
New_Steps(:,kkk) = Steps(:,conta);
conta = conta + 1;
end
end
for m_aux = 1:M % Esto establece la complejidad del detector (con esto
para y el anificado para tenemos  $M * M^{(df-1)} = M^{df}$  operaciones que
es lo que establece la complejidad del MPA
for kkk = 1:M^(df-1)
acum = 0;
for kkkk = 1:col
if kkkk ~= Actual_VarNode
acum = acum + Ivg(kk,Users_Rec(kkkk),New_Steps(kkk,kkkk)); % A medida
que trabajamos con cifras, el producto se convierte en una suma
end
end
Position_aux = [New_Steps(kkk,:),kk];
Position_aux(Actual_VarNode) = m_aux;

```

```

Position = num2cell(Position_aux); % Para transformar el vector en una
posición dentro de la matriz
    Aux_lgv(conta) = f_n(Position{:}) + acum;
conta = conta + 1;
end
lgv(kk,Users_Rec(Actual_VarNode),m_aux) = log_sum_exp(Aux_lgv); % Una
operación de suma en escala lineal se convierte en la LSE en el dominio
de registro
end
end
end
% Actualización de mensajes lgv (nodo variable a nodo de función) ->
(nodo variable para el nodo de recursos)
for kk = 1:V % Generamos mensajes de cada nodo variable
Chips_User = find(T(:,kk) == 1); % Chips que utiliza el usuario kk-ith (Nodos
de funciones que se conectan con el nodo variable kk-th)
for Actual_FunNode = 1:N % Enviamos mensajes a cada nodo de
función que se conecta con el nodo variable kk-th
for kkk = 1:M
acum = 0;
for kkkk = 1:length(Chips_User)
if kkkk ~= Actual_FunNode
acum = acum + lgv(Chips_User(kkkk),kk,kkk) -
log(sum(exp(lgv(Chips_User(kkkk),kk,:)))); % El último término es la parte de
normalización, la operación exp lleva la información al dominio real y, por
lo tanto, dejamos el dominio de registro (exp (log (x)) = x), luego
agregamos y volvemos al dominio de registro
lgv(Chips_User(Actual_FunNode),kk,kkk) = log(Prior_Prob_CodW) + acum;
end
end
end
end

```

%% Paso 3: LLR output (Cálculo del LLR en cada nodo variable después de tener iteraciones)

% Probabilidad de conjetura de cada CodeWord en cada capa (probabilidad de tener cada palabra de código para cada usuario)

```
Q_v = zeros(M,V);
```

```
for kk = 1:V
```

```
Chips_User = find(T(:,kk) == 1); % Chips que utiliza el usuario kk-ith (Nodos de funciones que se conectan con el nodo variable kk-th)
```

```
for kkk = 1:M
```

```
acum = 0;
```

```
for kkkk = 1:length(Chips_User)
```

```
acum = acum + lgv(Chips_User(kkkk),kk,kkk);
```

```
end
```

```
Q_v(kkk,kk) = log(Prior_Prob_CodW) + acum;
```

```
end
```

```
end
```

% LLRs

```
LLR = zeros(V,log2(M));
```

```
for kk = 1:V
```

```
for kkk = 1:log2(M)
```

```
acum0 = 0; acum1 = 0;
```

```
for kkkk = 1:M
```

```
if Mapping(kkk,kkkk) == 0
```

```
acum0 = acum0 + exp(Q_v(kkkk,kk)); % La operación exp lleva las Q al dominio real y, por lo tanto, dejamos el dominio de registro (exp (log (x)) = x)
```

```
elseif Mapping(kkk,kkkk) == 1
```

```
acum1 = acum1 + exp(Q_v(kkkk,kk));
```

```
end
```

```
end
```

```
LLR(kk,kkk) = log(acum1/acum0); % Resultado del cálculo de LLR
```

Con la finalidad de tener un entendimiento más gráfico del código expuesto, se presenta la gráfica 9, la cual detalla un diagrama de bloques de la estructura de funcionamiento de la transmisión y recepción en un sistema SCMA

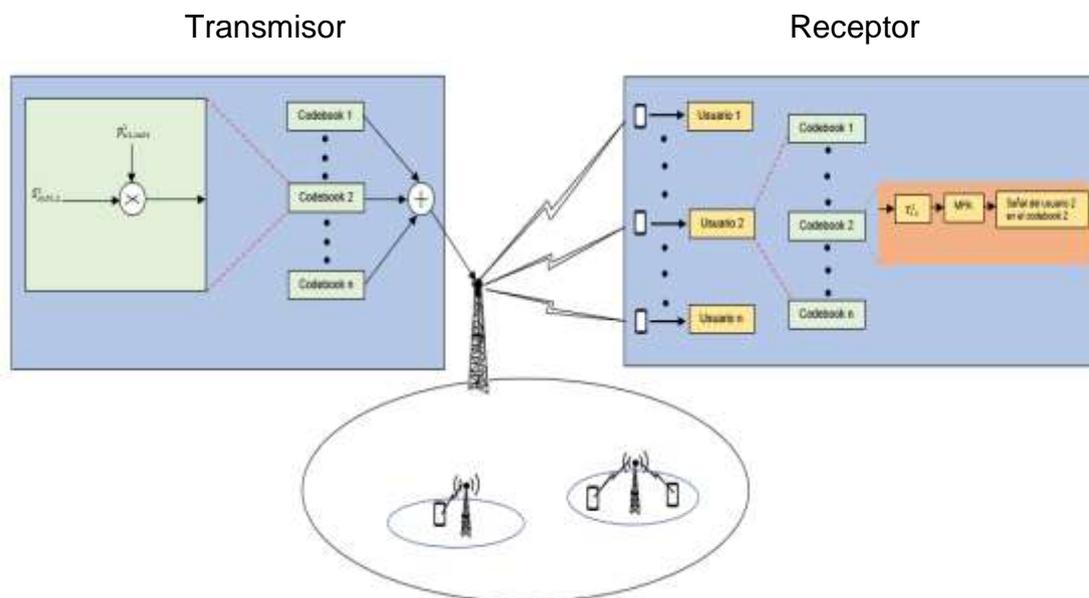


Figura 10: Diagrama en bloques de SCMA

Adaptado de (Mokari, Javan, Moltafet, Saeedi, & Pishro-Nik, 2017).

dónde $S_{sub1,2}^1$ es el mensaje que la BTS 1 envía en la subportadora sub1 en el codebook 2, $p_{u1,sub1}^1$ es la potencia de transmisión de BTS 1 al usuario u1 sobre la subportadora sub1, $Y_{2,2}^1$ es la señal recibida en el usuario 2 en BTS 1 sobre la subportadora 2.

En la figura 10 se puede apreciar la esquematización del funcionamiento del sistema SCMA, donde existen 6 usuarios transmitiendo en cuatro subportadoras en mismo instante de tiempo multiplexados sobre OFDM.

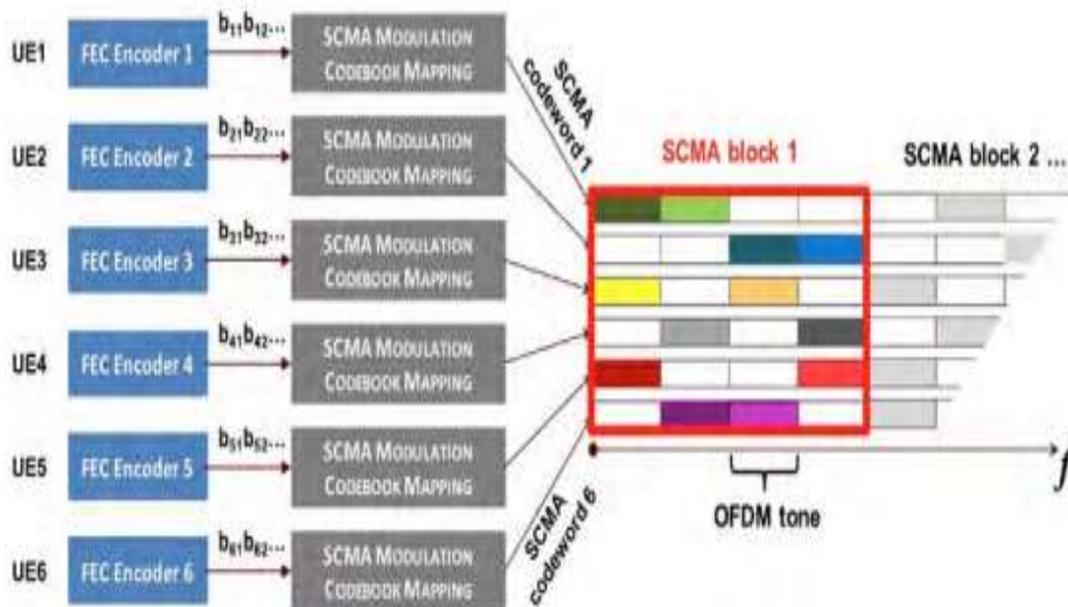


Figura 11: Diagrama en bloques de SCMA

Tomado de (Rábanos, 2018)

2.4 Probabilidad de error de bit Calculada.

En esta sección, se presentan diferentes curvas en función de la probabilidad de error de bit (BER, el número de bits recibidos de manera errónea en relación al total de bits transmitidos) en función de la relación señal a ruido normalizada (E_b/N_0), las curvas fueron obtenidas mediante la aplicación del método de Monte Carlo en el software Matlab. A continuación, en la tabla 2 se describen las variables que fueron usadas como parámetros para la simulación en el entorno SCMA unicelular.

Tabla 2.

Parámetros de la simulación

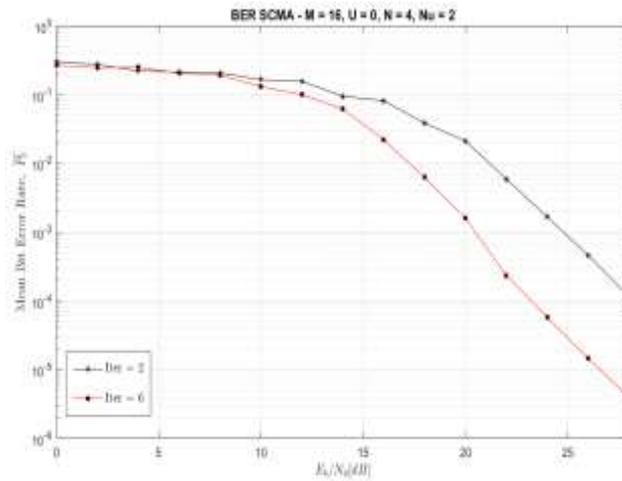
Descripción	Parámetro	Valor
Modulación	M	16-QAM

Número de Usuarios	Nu	2
Número de subportadoras	K	4
Número de iteraciones	N-iter	2, 6
Valor medio de la señal determinística	U	0, 0.5 y 1
Número de subportadoras en las que los usuarios transmiten información	N	2

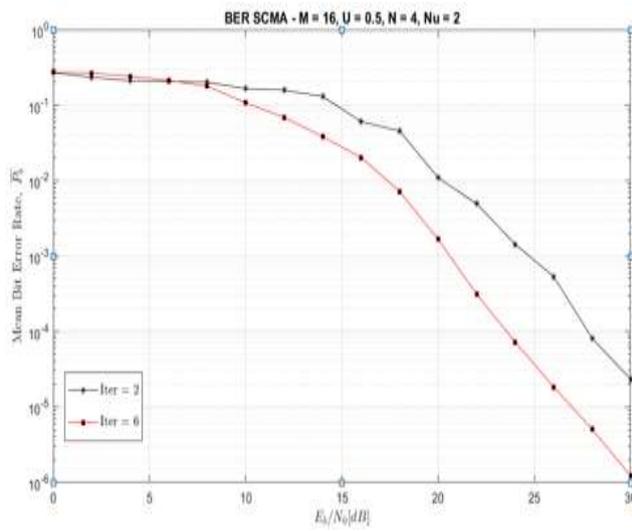
Adicionalmente, a los parámetros expuestos en la tabla 2, es importante mencionar que en las simulaciones del sistema SCMA con canal Rice se utilizó $\sigma = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)$, a fin de normalizar la potencia media de los múltiples trayectos que es igual a $2\sigma^2$.

En la figura 11 se presentan las diferencias entre las curvas resultantes de un sistema SCMA unicelular operado en un canal de tipo Rice sin interferencia de los usuarios de las co-células. En este sentido, en la figura 11 se puede evidenciar el desempeño del sistema en términos de la probabilidad de error de bit en función de la relación señal a ruido en diferentes escenarios, con distintos valores de amplitud media de la señal determinística (línea de vista) y número de iteraciones. Específicamente, la figura 11 (a) considera $U = 0$, la figura 11 (b) considera un $U = 0.5$ y la figura 10 (c) considera $U = 1$. En estas figuras se puede evidenciar que a medida que aumenta el valor medio (amplitud media) de la señal determinística y el número de iteraciones, la probabilidad de error de bit disminuye considerablemente. Por ende, se determina que el desempeño del sistema mejora. En este sentido, en las figuras se puede apreciar que, a partir de los 12 dB, la diferencia entre las curvas con 2 iteraciones y 6 iteraciones se empiezan a aumentar, es así que, la curva con 6 iteraciones empieza a descender pronunciadamente llegando a BER de 10^{-6} a los 30 dB (Figura 11 b)

a)



b)



c)

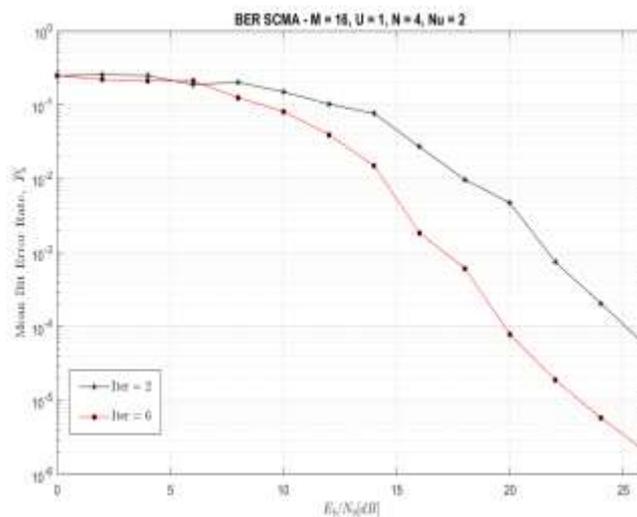


Figura 12: Probabilidad de error de bit (BER) en función de la relación señal a ruido E_b/N_0 dB parametrizado por el U y el número de iteraciones considerando una modulación 16-ária en una canal de transmisión de tipo Rice.

- a) BER en función de la relación señal a ruido E_b/N_o dB con $U = 0$.
- b) BER en función de la relación señal a ruido E_b/N_o dB con $U = 0.5$
- c) BER en función de la relación señal a ruido E_b/N_o dB Con $U = 1$

La razón por la cual la BER disminuye cuando el número de iteraciones aumenta, es porque un mayor número de iteraciones implica que la probabilidad de error de bit disminuya.

Al aumentar el valor de U se aumenta la potencia del trayecto con línea de vista y como consecuencia, la BER disminuye, lo que implica que exista un menor margen de error o equivalentemente un menor desempeño. De forma particular si $U=0$, el canal con desvanecimiento es de tipo Rayleigh, que implica el peor escenario de desempeño, esto es que no exista línea de vista entre la estación transmisora y la estación receptora.

3 CAPÍTULO III. DESEMPEÑO DEL SISTEMA SCMA EN ENTORNOS CELULARES

Introducción

En este capítulo se muestran los resultados del desempeño de SCMA dentro de entornos celulares, es decir escenarios donde existe interferencia por parte de la propia célula y de las co-células. Así, la idea de este capítulo es entender el comportamiento de sistemas SCMA cuando existe presencia de interferencia que el detector MPA no puede mitigar, esto es, interferencia que se produce en las co-células.

La interferencia de co-células se da al momento de que una célula usa la misma frecuencia portadora que la célula de interés, todo esto se da debido al reúso de frecuencias, el cual afecta de forma desfavorable al sistema (Ayala, 2003).

3.1 Sistema Celular

Un sistema celular es una arquitectura compuesta por agrupación de una o varios grupos de células y cada grupo con varias células se denominan clúster. La cobertura de cada célula la provee una BTS, un ejemplo de sistema celular se muestra en la figura 12. Adicionalmente, en este tipo de sistemas se usa la reutilización de canales y el concepto asociado es el factor de reúso (F) definido en (1.1.1). Además, la interferencia de co-canal para el usuario de interés es producida por los usuarios de las co-células. Finalmente, para esta investigación se establece que las co-células también están utilizando un sistema SCMA.

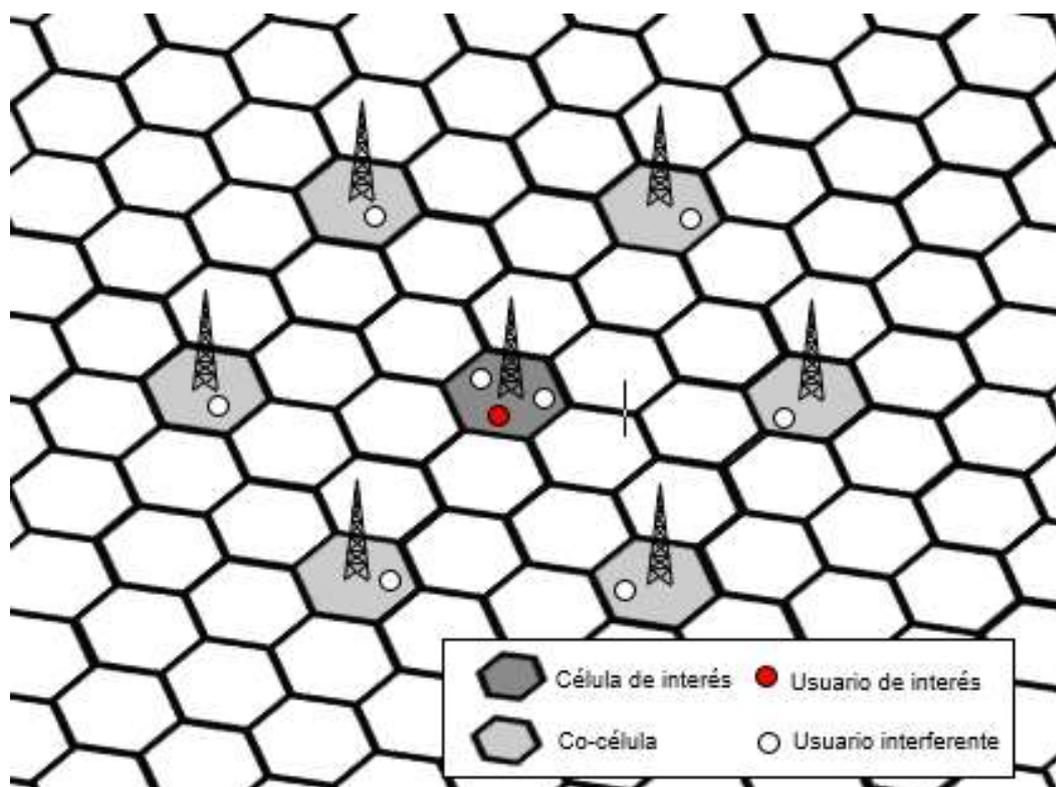


Figura 13: Modelo de sistema Celular.

Adaptado de (Carvajal, 2014).

3.2 Distribución espacial de los usuarios en las células

Podemos asumir que los usuarios que se encuentran dentro de una célula están distribuidos de manera uniforme en el área de dicha célula, como se puede observar en la figura 13. Estos usuarios están a una distancia r de la BTS, la cual cumple con $R(0) \leq r \leq R$ donde $R(0)$ y R son los radios interno y externo de la célula de interés, respectivamente. Además, θ es el ángulo formado entre el radio R de la célula y la ubicación del usuario de interés. En consecuencia, se asume que para valores de r fuera del rango mencionado, los usuarios se encontrarán fuera de la cobertura celular. Dada la distribución de los usuarios dentro del área de la célula, es posible indicar las funciones de distribución de probabilidad de las variables aleatorias independientes r y θ están definidas por:

$$f_R(r) = \frac{2r}{R^2 - R_0^2}, \quad R_0 \leq r \leq R$$

(Ecuación 26)

$$f_\theta(\theta) = \frac{1}{2\pi}, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

(Ecuación 27)

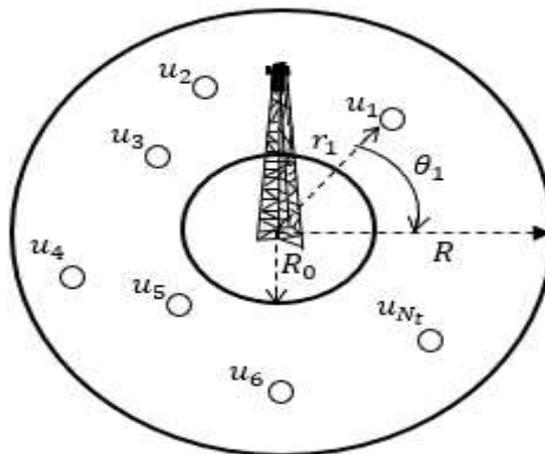


Figura 14: Distribución espacial de usuarios en la célula.

Adaptado de (Carvajal, 2014).

Tomando en cuenta las condiciones anteriores para la célula de interés y para las co-células, es decir, los usuarios de las co-células también están uniformemente distribuidos en el área de cada célula, se puede determinar la distancia entre el usuario de interés y k -ésimo, la BTS de la célula de interés y está dado por:

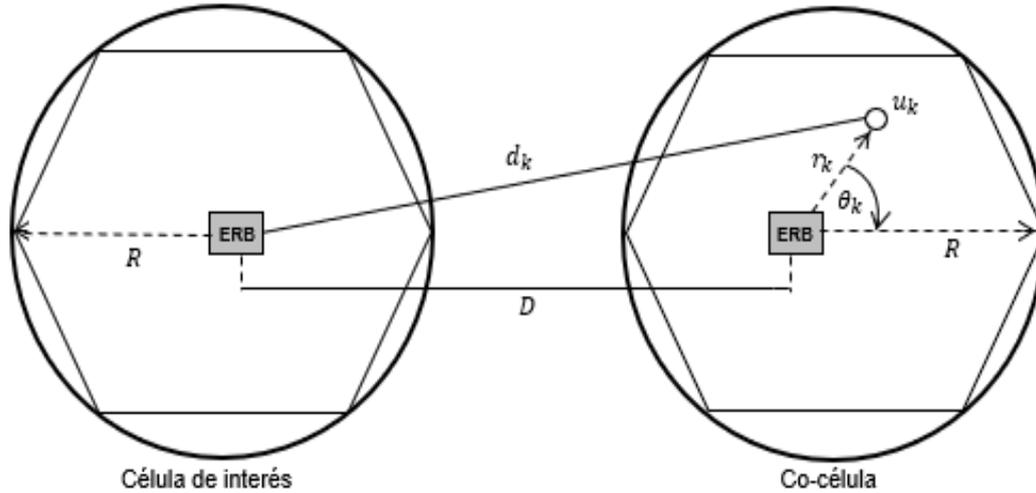


Figura 15: Distancia entre el usuario y BTS de interés y el k -ésimo usuario interferente.

Adaptado de (Carvajal, 2014).

$$d = \sqrt{D^2 + r^2 + 2Dr \cos(\Omega - \theta)}$$

(Ecuación 28)

dónde D es la distancia entre la BTS de la co-célula y la BTS de la célula de interés. r es la distancia entre la BTS de la co-célula y el usuario k -ésimo. Ω es el ángulo que forma la BTS de la célula de interés con la BTS de la co-célula. θ es el ángulo que forma la BTS de la co-célula y el usuario k -ésimo.

3.3 Resultados de la probabilidad de error de bit de SCMA con interferencia de los usuarios de las co-células

El empleo del detector MPA en sistemas SCMA da lugar a una cancelación

eficiente de la interferencia utilizando detección de baja complejidad. Además, el hecho de que cada usuario transmite una secuencia de *codeword* única y en distintas subportadoras que otros usuarios. Además, a estas secuencias transmitidas se les adiciona interferencia de los usuarios garantiza también una detección de baja complejidad. Con el objetivo de garantizar un escenario apegado a la realidad, se considera la presencia de interferencia generada por usuarios de las co-células, los mismos que para temas de simulación fueron creados de forma aleatoria e independiente.

Los resultados de las simulaciones de Monte Carlo realizadas permiten comparar el desempeño de SCMA en entornos multicelulares en términos de la BER en función de la relación señal a ruido. Adicionalmente, en las simulaciones, se consideró un sistema multicelular con diferentes factores de reuso F y potencia media de la señal determinística U (Canal Rice). Los valores considerados para estas variables se resumen en la tabla 2. Además, se realizó un análisis en términos del número de iteraciones realizadas por el detector MPA, pues su complejidad es directamente proporcional a la cantidad de dichas iteraciones. En este sentido, se estableció en $N_{iter} = 6$ la cantidad de iteraciones. Finalmente, en el escenario considerado, el número de usuarios en el sistema es mayor que el número de subportadoras. Específicamente transmiten 6 usuarios de forma simultánea utilizando 4 subportadoras y una modulación 16-aria.

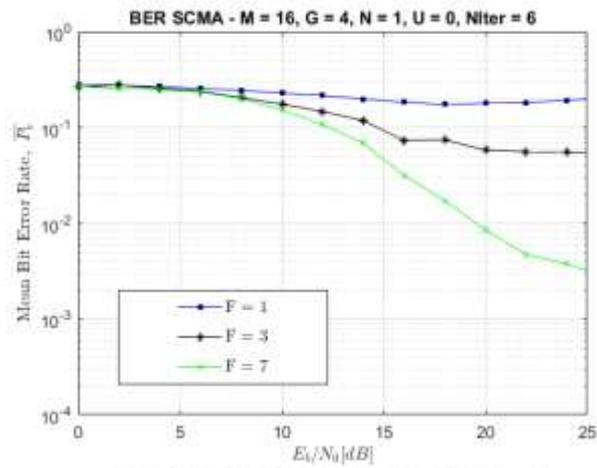
En la figura 15 se observan la BER en función de la SNR para un sistema SCMA con desvanecimiento de tipo Rice y presencia de interferencia de las co-células, considerando lo expuesto anteriormente. Para cada escenario se realizaron diferentes simulaciones con el fin de determinar cuál de estos proporciona el mejor desempeño del sistema. Como se puede observar en la figura 15 (a), que considera $U=0$ para una relación señal a ruido $\frac{E_b}{N_o} \cong 25$ dB, la BER obtenida con un factor de reuso $F=1$ fue aproximadamente $BER = 0,2$, mientras que para $F=3$, la tasa de error de bits promedio fue $BER = 5 \times 10^{-2}$. Cuando $F=7$, el desempeño mejoró considerablemente obteniendo una $BER = 3 \times 10^{-3}$, en la figura 15 (b) se muestran las curvas resultantes para un escenario con $U = 0,5$, en el cual se

considera la misma relación señal a ruido anterior, se obtiene una $BER = 0,1$ cuando el factor de reuso es $F=1$. Es interesante observar que en este escenario, el desempeño del sistema con relación a un sistema con $F=3$, casi no difiere. Para analizar este escenario con más detalle se debe aumentar el número de iteraciones. Cuando $F=7$, el desempeño mejora considerablemente, así para $SNR = 25$, se obtiene una $BER = 3 \times 10^{-3}$.

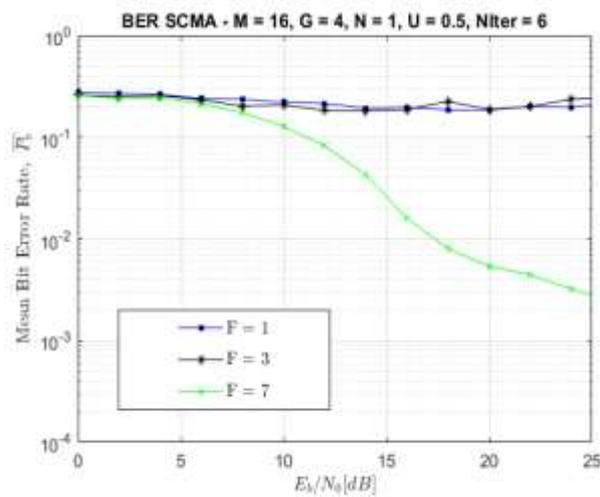
Finalmente, en la figura 15 (c) se muestra los resultados de un escenario cuando $U=1$ y tomado en cuenta la misma relación señal a ruido, la BER del sistema cuando $F=1$ y $F=3$ no representa mayor cambio con relación a los escenarios anteriores. Sin embargo, cuando $F=7$ el desempeño mejora y así, la $BER = 2 \times 10^{-3}$. Por lo tanto, al realizar este tipo de análisis, se determina que con un factor de reuso mayor la interferencia disminuye, pero reduce el desempeño del sistema. No obstante, es importante recordar que un mayor factor de reuso implica menos canales por célula. Así, se sacrifica la capacidad de la célula para disminuir los niveles de interferencia.

Al realizar la comparación de los escenarios celular (figura 15) con los escenarios unicelular estudiados en el capítulo 2 (figura 11), se puede observar que para el mismo número de iteraciones en ambos casos ($Niter = 6$) y con el mismo valor de la potencia media $U=1$, el escenario en que no existe interferencia de las co-células, se tiene un desempeño con una $BER \approx 2 \times 10^{-3}$, mientras que para el escenario en el que se toma en consideración la interferencia de los usuarios de las co-células se obtiene una $BER \approx 10^{-6}$ con una relación señal a ruido $\frac{E_b}{N_o} \cong 26$ dB, para ambos casos. En este sentido, se evidencia que cuando el sistema es afectado por interferencia de las co-células, el desempeño disminuye. Adicionalmente, en los dos escenarios considerados (con y sin usuarios interferentes de las co-células) se observa la que el cuándo se aumenta el valor medio de la señal determinística la BER disminuye.

a)



b)



c)

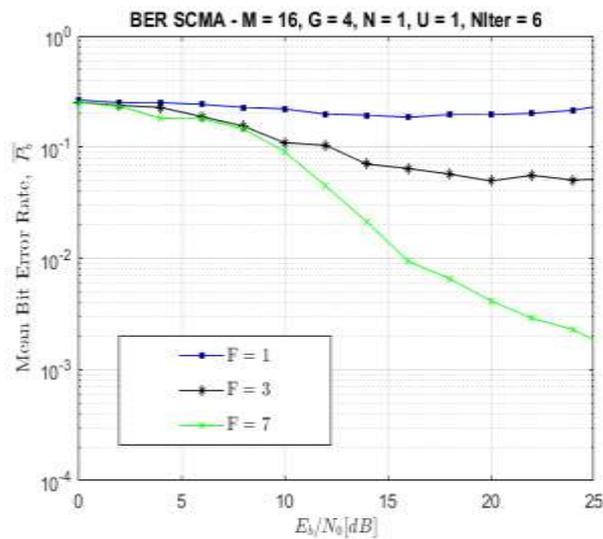


Figura 16: BER en función de la SNR normalizada (E_b/N_0) de un sistema SCMA multicelular con desvanecimiento de tipo Rice en presencia de interferencia proveniente de co-células, considerando modulación 16-aria, el algoritmo MPA con 6 iteraciones, 6 usuarios y 4 subportadoras

- a) BER en función de la relación señal a ruido E_b/N_o dB con $U = 0$.
- b) BER en función de la relación señal a ruido E_b/N_o dB con $U = 0.5$
- c) BER en función de la relación señal a ruido E_b/N_o dB Con $U = 1$

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

En el presente proyecto de titulación se implementaron rutinas de simulación en el software MATLAB con el objetivo de determinar la BER de un sistema SCMA que opera en un canal con desvanecimiento de tipo Rice y presencia de interferencia.

Se analizó la técnica SCMA debido a que es una propuesta para sistemas 5G. Esta técnica de acceso múltiple, al ser no ortogonal permite el uso de los mismos recursos de radio por varios usuarios de forma simultánea. Para el caso del receptor se implementó el algoritmo de intercambio de mensajes (MPA) y se evaluó su desempeño en diferentes escenarios de operación.

En cuanto a la simulación del sistema SCMA en un ambiente celular, se utilizaron rutinas en el software MATLAB, en las cuales se estableció determinadas variables. Se pudo comprobar que, al aumentar el número de iteraciones del receptor MPA, el valor medio de la potencia y el orden de la modulación, el procesamiento computacional se hacía más pesado debido a que la complejidad de detección sistema aumenta.

De los resultados obtenidos se desprende que, cuando el sistema es afectado por interferencia de las co-células, su probabilidad de error de bit aumenta en comparación a aquella que se obtiene en un sistema unicelular, en el cual la única interferencia que afecta al sistema es la procedente de su propia célula, producto del diseño de SCMA. Además, en el escenario celular se establece que el desempeño es directamente afectado por el factor de reuso, es decir, si este aumenta, el desempeño mejora. Sin embargo, se debe recordar que a mayor factor de reuso, menor es la capacidad del sistema. Además, cuando el valor medio de la señal determinística aumenta, el desempeño del sistema mejora gradualmente.

Finalmente, los resultados presentados en este trabajo de titulación generan una visión más amplia del desempeño de una de las técnicas propuestas para los sistemas móviles 5G.

4.2 Recomendaciones

En el ámbito de la detección dentro de SCMA, se recomienda que en trabajos futuros se profundice el análisis referente a los diferentes receptores que se pueden implementar dentro de este, logrando presentar resultados que permitan demostrar que tipo de receptor resulta ser óptimo para este tipo de técnica de acceso múltiple.

También, se aconseja modificar el número de iteraciones en las simulaciones con el objetivo de obtener resultados en los que se puede evidenciar con mayor detalle el compromiso que existe entre complejidad y desempeño.

Al simular un entorno de SCMA, se puede ver que aún existen dificultades en cuanto al receptor utilizado, por lo cual se recomienda hacer un estudio más profundo de MPA, el cual es el receptor que se utilizó en este trabajo, puesto que, aunque MPA reduce las complicaciones que presenta SCMA, no permite tener un óptimo tiempo de procesamiento dentro de su ejecución.

Finalmente, se sugiere utilizar otro software de simulación distinto a Matlab, entre los que se recomienda el uso del lenguaje R y Python para el desarrollo de un entorno de simulación más eficiente en cuanto a tiempos de ejecución, ya que se aprovecha la facilidad de ejecución matemática y estadística de R y al embeber con Python se reduce los tiempos de ejecución de las rutinas.

Referencias

- 3GPP. (2016). *LTE - Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Technical report*. 3GPP TS 36.213 version 13.2.0 Release 13.
- Alejos, V., Cruz, D., & Morales, M. (14 de noviembre de 2013). Análisis de Evaluación de Calendarizadores para Sistemas Celulares basados en LTE. México DF.
- Andrews, J. G. (2007). *Ghosh and R. Muhamed, Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking* (3° ed.). Pearson.
- Ayala, H. (2003). Diseño y construcción de un bloqueador telefónico para teléfonos celulares que trabajan en las tecnologías AMPS y/o TDMA en la banda de 800 MHz. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Barreno, D., Carrion., D., & Tenecora, I. (2016). Evolución de la Tecnología Móvil: *Camino a 5G*.
- Barry, J. (2004). *Digital Communication, volume 1* (3° ed., Vol. 1). Kluwer Academic Publishers.
- Bayer-Fluckige, E. (2004). New algebraic constructions of rotated Zn-lattice constellations for the Rayleigh fading channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, 702-7014.
- Boutros, J., & Viterb, E. (1998). Signal Space Diversity: A Power-and BandwidthEfficient Diversity Technique for the Rayleigh Fading Channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1453-1467.
- Burg, A. (2005). *VLSI Implementation of MIMO Detection Using the Sphere Decoding Algorithm*. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1566-1577.
- Cacciapuot, A. (2007). FIR Zero-Forcing Multiuser Detection and Code Designs for Downlink MC-CDMA. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 4737-4751.
- Cai, D., Fan, P., Lei, X., Liu, Y., & Chen, D. (2016). *Multi-Dimensional SCMA Codebook Design Based*. IEEE 83rd Vehicular Technology Conference, Nanjing, China.
- Carvajal, H. (2014). *Avaliação do Desempenho do Enlace Reverso de Redes Celulares utilizando a Técnica CDMA com Multiportadoras (MC-CDMA)*

- em um canal Rayleigh Seletivo em Frequência*. Universidad Estatal de Campinas, Campinas, Brasil.
- Carvajal, H. (2018). *Bit Error Rate and Spectral Efficiency Evaluation of MC-CDMA Cellular Systems Employing Multiuser Detection*. Universidad Estatal de Campinas, Campinas, Brasil.
- Castoldi, P. (2002). *Multiuser Detection in CDMA Mobile Terminals* (1° ed.). Artech House.
- Chang, J. R., & Gibby, R. A. (1968). *A Theoretical Study of Performance of an Orthogonal Multiplexing Data Transmission Scheme*. IEEE Transactions on Communication Technology, 529-540.
- Frison, C. I. (2019). *Análise de Matrizes de Rotação para Diversidade Espacial de Sinais e Comparação de Desempenho e Complexidade entre as Técnicas MC-CDMA e SCM*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas.
- Gallager, R. (1962). *Low-Density Parity Check Codes*. Transactions on Information Theory, 21-28.
- Goldsmith, A. (2005). *Wireless Communications*. New York: Cambridge University Press.
- Holma, H., & Toskala, A. (2011). *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced*. John Wiley and Sons.
- Holma, H., Toskala, A., & Reunanen, J. (2016). *LTE Small Cell Optimization: 3GPP*. West Sussex, UK: John Wiley and Sons.
- Hoshyar, R., Watha, F., & Tafazolli, R. (2008). *Novel Low-Density Signature for Synchronous CDMA Systems Over AWGN Channel*. IEEE Transactions on Signal Processing, 1616-1626.
- HUAWEI. (2015). *5G: New Air Interface and Radio Access Virtualization*.
- Jakes, W. (1974). *Microwave Mobile Communications*. IEEE Press, Wiley Interscience.
- Mokari, N., Javan, M., Moltafet, M., Saeedi, H., & Pishro-Nik, H. (20 de 6 de 2017). *A New Multiple Access Technique for 5G: Power Domain Sparse Code Multiple Access (PSMA)*.
- Moon, T. K. (2005). *Error Correction Coding: Mathematical Methods and*

- Algorithms* (1° ed.). John Wiley y Sons.
- Nikopour, H., & Baligh, H. (2013). *Sparse Code Multiple Acces*. In 24th IEEE International Symposium on Personal,, 1-3.
- Oppenheim, A., & Schafer, R. (1999). *Discrete-Time Signal Processing* (2° ed.). New Yersey: Prentice Hall.
- Perea, R. (2014). *5G: A new generation for a new society*.
- Proakis, J., & Manolakis, D. (2007). *Digital Communications*. New York: McGraw.
- Rábanos, J. M. (2018). *Modulación y multiacceso en 5G*.
- Rao, K., Bojkovic, Z., & Milovanovic, D. (2009). *Wireless Multimedia Communications. Convergence, DSP, QoS, and Security*. CRC Press.
- Rappaport, T. (1996). *Wireless Communications, principles and practice*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Riazul, S., Avazon, N., O.Dobre, & Kwak, K. (2016). *Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challengers*. 1-5.
- Saltzberg, B. R. (1967). *Performance of an Efficient Parallel Data Transmission System*. IEEE Transactions on Communication Technology, 805-8011.
- Stallings, W. (2005). *Wireless Communications and Networks*. NJ Person.
- Taherzadeh, M., Nikopour, H., bayesteh, A., & Baligh, H. (2014). *SCMA Codebook Desing*. *IEEE Xplore*, 1-5.
- Wu, Y., Wang, C., Chen, Y., & Bayesteh, A. (2017). *Sparse Code Multiple Access for 5G Radio Transmission*. IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Toronto, Canadá.
- Yacoub, M. (2012). *Wireless Technology. Protocols, Standards and Techniques*. CRC-Press.
- Yang, H., Fang, X., Liu, Y., Li, X., Luo, Y., & Chen, D. (2016). *Impact of Overloading on Link-Level Performance for Sparse Code Multiple*. Wireless and Optical Communications Conference, Chengdu, China.

