

GUEFRY LEIDER AGREDO MÉNDEZ



DISEÑO DE UN ESQUEMA DE DETECCIÓN L-MIMO
PARA SISTEMAS DE COMUNICACIONES
INALÁMBRICAS

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Doctorado en Ciencias de la Electrónica

Popayán
2018

GUEFRY LEIDER AGREDO MÉNDEZ

DISEÑO DE UN ESQUEMA DE DETECCIÓN L-MIMO
PARA SISTEMAS DE COMUNICACIONES
INALÁMBRICAS

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones de la
Universidad del Cauca para la obtención del
Título de

Doctor en:
Ciencias de la Electrónica

Director:
Ph.D. Pablo Emilio Jojoa Gómez
Co-Director:
Ph.D. Vicenç Almenar Terré (UPV - España)

Popayán
2018



UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
Doctorado en Ciencias de la Electrónica

ACTA DE SUSTENTACIÓN TESIS

Siendo las 09:00 hrs del día miércoles 20 de diciembre del año 2017, el estudiante: Guefry Leider Agredo Méndez, código: 70_76323459, sustentó la Tesis de Doctorado titulada: *Diseño de un Esquema de Detección L-MIMO para Sistemas de Comunicaciones Inalámbricas*.

Director: PhD. Pablo Emilio Jojoa y
Co-director: Vicenç Almenar Terré

Comisión de Evaluación integrada por:

Natalia Gaviria Gómez, Univ. de Antioquia (Medellín, Colombia)
Alberto González Salvador, Univ. Politécnica de Valencia (Valencia, España)
Alfonso Bahillo Martínez, Univ. de Deusto (Bilbao, España)
Andrés Navarro Cadavid, Univ. ICESI (Cali, Colombia)

Resultado de la evaluación:

APROBADO
 APLAZADO

APROBADO CON OBSERVACIONES
 NO APROBADO

Para constancia se firma en Popayán, a los 20 días del mes de diciembre del 2017.

Jurado 1:



Dr. Natalia Gaviria Gómez

Jurado 2:



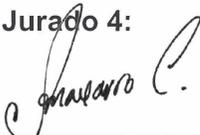
Dr. Alberto González Salvador

Jurado 3:



Dr. Alfonso Bahillo Martínez

Jurado 4:



Dr. Andrés Navarro Cadavid



PhD. Álvaro René Restrepo Garcés.
Coordinador Doctorado

*A mi esposa Luisa Fernanda,
a mis hijos Santi y Maiky
y a mis padres Ludivia y Juan B,
quienes con mucho amor aguantaron,
dándome ánimos para continuar.
Es por ustedes y su paciencia
que este logro ha sido posible.
¡Los amo infinitamente!*

Agradecimientos

A Dios por todas las cosas que ocurrieron permitiendo que este logro fuera posible, pero especialmente por haberme dado la voluntad para que a pesar de los contratiempos, los momentos difíciles y las angustias, pudiera seguir adelante. Y gracias por todas las personas que me permitió conocer en este proceso, pienso que son lo más importante y perdurable que me queda.

A mi esposa Luisa Fernanda (Mi Peque) y a mis hijos Santiago Alejandro (Santi) y Miguel Angel (Maiky) por su amor, su paciencia y la motivación que me dieron para seguir adelante, teniendo en mucho que resignarse a soportar este proceso que me demandó mucho tiempo y esfuerzo e inclusive estar físicamente alejado de ellos. Espero poderlos compensar en lo que me resta de vida.

A mis padres Ludivia y Juan B, quienes en silencio me dieron su apoyo para poder lograr esta meta, siempre supieron que era algo que me había propuesto alcanzar. A mi sobrino y hermanos por lo que hemos compartido y estar siempre de forma incondicional.

A mis directores Pablo Emilio y Vicenç, quienes no solo estuvieron para recurrir en lo técnico, sino que como amigos fueron los primeros en escuchar y darme ánimos. Gracias por sus revisiones e indicaciones. Pablo, gracias especiales por el apoyo en los trámites administrativos, en las cartas, comunicaciones y demás. Vicenç, gracias especiales por las facilidades que me permitiste en mi estancia en la UPV de Gandía, por lo que me diste a conocer de la UPV en Valencia y por la invitación a la mejor paella valenciana que he podido disfrutar.

A los evaluadores de este documento, por haber aceptado esta labor y por participar en el momento culmen de este proceso que da paso a una siguiente fase en mi vida.

En Colombia:

A Mariela y Eduardo, con quienes tuve la fortuna de disfrutar momentos durante mi pasantía en la Universitat Politècnica de València. Sentir la atención y trato colombiano

y particularmente payanés, no tiene descripción estando tan lejos.

A mis colegas del Departamento de Telecomunicaciones por su apoyo para haber podido adelantar estos estudios de doctorado, por siempre haber estado cuando fue necesario, en casos de inquietudes académicas o en momentos donde me sirvió cambiar de ambiente, ... y bueno, también por su irritante "¿Cómo vas ... ya casi?".

A mis compañeros de estudio: Evelio, Fausto y Neil, con quienes se dieron unas muy buenas terapias de grupo, necesarias para compartir y superar afugias en este proceso, por poner a correr nuevamente las simulaciones cuando los equipos se bloqueaban o se iba la energía y por la ayuda con \LaTeX .

Al los colegas del comité de programa de doctorado en Ciencias de la Electrónica, por su acompañamiento, los trámites administrativos especialmente por los apoyos recibidos, y por los momentos compartidos durante el período que fui parte del mismo.

A mis estudiantes, tanto los dirigidos como los de clases en pregrado y posgrados, por su comprensión, como cuando me demoré en entregas, pues, se me hizo necesario tomar algo de tiempo para completar lo que me faltaba para este propósito.

A Cris y Leo por sus explicaciones y hacer muy grata mi estancia de investigación nacional. Los llevó en mi corazón y agradezco enormemente el tiempo que me dedicaron y ahora tenerlos como mis "parceros".

A Andrés, por los momentos compartidos muchos de los cuales en eventos, especialmente de IEEE, y por haber ayudado al logro de esta meta.

En España:

A Julián (Argentina) y a Iván (Perú) porque en medio de seis meses de una terrible soledad me ayudaron a hacer más soportable el proceso. Les estoy enormemente agradecido, Dios los bendiga y a sus familias.

A Alfonso y María, por estar allí, por llamar de vez en cuando, y que con tan solo un día que compartimos en Madrid, las vivencias y recuerdos invidables, recargaron mis fuerzas y me motivaron para continuar.

A Alberto, a quien solo le bastó una corta entrevista para que sus palabras reconfortantes tanto académica como emocionalmente, me devolvieran la fe en lo que estaba haciendo y perseguía.

A la gente de la Universitat Politècnica de València (Gandía) como Pepe, Pau, Javier y Paco, por la siempre disposición para compartir, entre otras cosas: un café, una "bocadillo", un "esmorzaret"; o participar en un evento; o el acceso y solución de situaciones en el laboratorio, ... en fin. Gracias Pepe, trabajar con aire acondicionado en

verano se te agradece en el alma!

Y a los chicos que conocí por mi estancia en Gandía, con los que pude revivir la época de estudiante en el grato sentido de la palabra. De Colombia: Julie, Jorge, Alejandra; de Latinoamérica: Alejandro (Venezuela), Jose (México) y de España: Álvaro, José "Cuervo", Javier, Juan, Raúl y Pau.

A la gente de la iglesia de San Nicolás de Gandía, especialmente al Padre Efrén (Colombia), Magola (Colombia) y a Gregory (Guatemala) por el soporte espiritual y emocional que me proporcionaron.

... y aunque podría continuar, dejo en este punto agradeciendo a todos aquellos que me acompañaron y estuvieron pendientes de este proceso y aportaron de una u otra forma al mismo.

Resumen

La tecnología inalámbrica 5G promete satisfacer las demandas de mayores velocidades y capacidades en la comunicación inalámbrica de datos. Una estrategia presentada en este contexto es el uso de una gran cantidad de antenas, conocida como L-MIMO. Sin embargo, con tal número de antenas uno de los desafíos es diseñar esquemas de detección en estos sistemas, en los cuales se puedan lograr algoritmos eficientes con baja complejidad, para posibilitar su implementación real. Esta Tesis presenta los resultados obtenidos con el diseño de dos esquemas de detección aplicando algoritmos basados en *Tabu Search*, comparándolos por simulación con detectores de referencia.

Palabras Clave: Comunicaciones Inalámbricas; L-MIMO; Detección MIMO; Búsqueda Tabú; 5G

Abstract

5G wireless promises to meet the demands for higher speeds and capabilities in wireless data communication. One strategy presented in this context is the use of a large number of antennas, known as L-MIMO. However, with such number of antennas one of the challenges is to design detection schemes in these systems, in which efficient algorithms with low complexity can be achieved, to enable their real implementation. This thesis presents the results obtained with the design of two detection schemes applying Tabu Search based algorithms, comparing them by simulation with reference detectors.

Key words: 5G; Wireless Communications; L-MIMO; MIMO detection; Tabu Search; 5G

Contenido

	Pág.
Lista de Figuras	XIX
Lista de Tablas	XXI
Capítulo 1. Introducción	29
1.1 Antecedentes	30
1.2 Motivación y Alcance	31
1.3 Objetivos	32
1.3.1 General	32
1.3.2 Específicos	32
1.4 Aportes	32
1.4.1 Abstracción de Metaheurística	33
1.4.2 Diseño y Simulación del Esquema de Detección MMSE-TS	33
1.4.3 Diseño y Simulación del Esquema de Detección MMSE-ZF	33
1.4.4 Mejoras en el Ambiente de Simulación	34
1.4.5 Documentación	34
1.5 Principales Resultados	35
1.5.1 Publicaciones	35
1.5.2 Trabajos de Grado	36
1.5.3 Software	37
1.5.4 Redes Académicas	37
1.5.5 Programación en MATLAB	37
1.5.6 Escritura de Documentos en \LaTeX	38
1.6 Organización del Documento	38
Capítulo 2. Hacia la Quinta Generación Inalámbrica - 5G	41
2.1 Escenarios de 5G	41
2.2 Estandarización del 3GPP en camino a 5G	44
2.3 Tecnologías que Soportan 5G	45

2.4	Estrategias para Espectro 5G	53
2.4.1	Ancho de Banda Celular Mejorado	53
2.4.2	Espectro Nuevo para 5G	55
2.4.3	No Autónomo 5G	57
Capítulo 3.	Sistemas MIMO con Gran Número de Antenas	59
3.1	MIMO Masivo	62
3.2	MIMO de Dimesiones Completas	67
3.3	MIMO a Gran Escala	70
3.4	Beneficios y Retos	73
Capítulo 4.	Detección en L-MIMO	77
4.1	Detección en MIMO	77
4.1.1	Modelo de Canal MIMO	79
4.1.2	Clasificación de los Detectores	80
4.2	Detectores que se Plantean en la Actualidad	82
4.3	Detectores de Referencia	84
4.3.1	Detector ZF	85
4.3.2	Detector MMSE	86
4.3.3	Versiones SIC	87
Capítulo 5.	Esquema de Detección Propuesto	89
5.1	Busqueda Tabú	89
5.1.1	Historia de la Búsqueda Tabú	91
5.1.2	Funcionamiento de la Búsqueda Tabú	93
5.1.3	Conceptos de la Búsqueda Tabú	94
5.2	Aplicación de la Búsqueda Tabú a L-MIMO	98
Capítulo 6.	Implementación y Resultados	105
6.1	Selección del Ambiente de Simulación	105
6.2	Descripción del Ambiente de Simulación	106
6.2.1	Aportes realizados al Ambiente de Simulación	108
6.3	Experimentación por Simulación y Resultados	109
6.3.1	Resultados para 4-QAM	112
6.3.2	Resultados para 16-QAM	115
Capítulo 7.	Conclusiones y Trabajos Futuros	121
7.1	Conclusiones	121
7.2	Trabajos Futuros	122

Referencias Bibliográficas	124
Anexo A. Codigos en MATLAB de los Esquemas de Detección Propuestos	137
Anexo B. Resultados Adicionales	143
Anexo C. Metodología de Simulación	147

Lista de Figuras

	Pág.
2.1 Organizaciones 5G	42
2.2 Estandarización 3GPP hacia 5G	45
2.3 Tecnologías que soportan 5G	46
2.4 Nueva Banda Disponible	47
2.5 Redes Actuales	47
2.6 Redes Actuales con Ondas Milimétricas	48
2.7 Red de Celdas Pequeñas	49
2.8 Comparación MIMO y MIMO masivo	49
2.9 Interferencia presente en MIMO masivo	50
2.10 Redes Actuales con Ondas Milimétricas	50
2.11 Escenarios de uso para IMT-2020	52
2.12 Capacidades clave de IMT-2020 vs IMT-Advanced	54
2.13 Espectro para la 5G	55
2.14 Soporte de 5G NR para nuevos espectros y bandas	56
2.15 Acceso Asistido a Licencia	57
2.16 Proceso de estandarización para 5G NR	58
3.1 Tráfico de datos móviles para 2021	60
3.2 Ejemplo de MIMO masivo (Estación base y dispositivos)	63
3.3 Arreglo Masivo de 96 Antenas: Argos	65
3.4 Prototipo en arreglo circular de 128 antenas sobre la Universidad de Lund	66
3.5 Prototipo LuMaMi en arreglo rectangular escalable de 128/160 antenas .	67
3.6 eNB con soporte para FD-MIMO	68
3.7 FD-MIMO con MU-MIMO	70
3.8 Ejemplo de MIMO a Gran Escala	71
3.9 Aplicación de MIMO a Gran Escala	72
4.1 Modelo de Canal en Multiplexación Espacial MIMO	79
4.2 Clasificación de los Algoritmos de Detección en MIMO	81
4.3 Arquitectura de Detección Lineal MIMO	85

4.4	Detección de 4 Flujos Espaciales utilizando SIC	88
5.1	Clasificación de Metaheurísticas	90
5.2	Diagrama de Flujo de los Algoritmos ZF-TS y MMSE-TS	103
6.1	Diagrama de Flujo General del Ambiente de Simulación	107
6.2	Interfaz Gráfica aportada al Ambiente de Simulación	109
6.3	Barra de Progreso aportada al Ambiente de Simulación	110
6.4	Equipos diferentes desarrollando las Simulaciones	111
6.5	Convenciones para Identificar a los Detectores	113
6.6	Desempeño MIMO 32 x 32 - 4QAM	114
6.7	Tiempo de Cómputo MIMO 32 x 32 - 4QAM	114
6.8	Desempeño MIMO 64 x 64 - 4QAM	115
6.9	Tiempo de Cómputo MIMO 64 x 64 - 4QAM	116
6.10	Desempeño MIMO 32 x 32 - 16 QAM	117
6.11	Tiempo de Cómputo MIMO 32 x 32 - 16 QAM	117
6.12	Desempeño MIMO 64 x 64 - 16 QAM	118
6.13	Tiempo de Cómputo MIMO 64 x 64 - 16 QAM	119
A.1	Código de la Función MMSE-TS	138
A.2	Código de la Función ZF-TS	139
A.3	Código de la Función TS	140
A.4	Función que trabaja sobre el Vecindario de la solución ZF o MMSE	141
A.5	Funciones Complementarias	142
B.1	Resultados MIMO 8 x 8 - 4QAM	143
B.2	Resultados MIMO 16 x 16 - 4QAM	143
B.3	Resultados MIMO 32 x 32 - 4QAM	144
B.4	Resultados MIMO 64 x 64 - 4QAM	144
B.5	Resultados MIMO 8 x 8 - 16QAM	144
B.6	Resultados MIMO 16 x 16 -16QAM	145
B.7	Resultados MIMO 32 x 32 -16QAM	145
B.8	Resultados MIMO 64 x 64 -16QAM	145
C.1	Fases de la Metodología de Simulación de Referencia	148

Lista de Tablas

	Pág.
3.1 Beneficios del uso de un Gran Número de Antenas en MIMO	74
3.2 Retos del uso de un Gran Número de Antenas en MIMO	76
5.1 Aplicaciones de la Búsqueda Tabú	92

Lista de Algoritmos

1	Algoritmo de Tabu Search	99
2	Pseudocódigo Algoritmos ZF-TS y MMSE-TS	101
3	Pseudocódigo Función ObtenerAlMejorEnElVecindario	102

Acrónimos

3GPP *3rd Generation Partnership Project*, Proyecto de Asociación para la Tercera Generación. 34, 45, 47, 54, 60

BS *Base Station*, Estación Base. 52, 53, 73

CSI *Channel State Estimation*, Estimación del Estado del Canal. 52

EBF *Elevation BeamForming*, Conformación de Haz de Elevación. 58

EHF *Extremely High Frequency*, Frecuencias Extremadamente Altas. 36

eNb *evolved Node B*, nodo B evolucionado. 57–60

FD-MIMO *Full Dimension MIMO*, MIMO de Dimensiones Completas. 35, 51, 57–60

GPU *Graphics Processor Unit*, Unidad de Procesamiento Gráfico. 94

IMT *Improved Mobile Telephone*, Telefonía Móvil Mejorada. XV, 34, 41, 42

IoT *Internet of Things*, Internet de las Cosas. 49

LAA *Licensed Assisted Access*, Acceso Asistido a Licencia. 34, 45, 59

LAS *Likelihood Ascent Search*, Búsqueda de Ascenso de Verosimilitud. 78

LBT *Listen Before Talk*, Escuchar Antes de Hablar. 45

LR *Lattice Reduction*, Reducción de Enrejado. 72, 74

L-MIMO *Large MIMO*, MIMO a Gran Escala. 70, 73, 78, 93, 100

- LS-MIMO** *Large Scale MIMO*, MIMO a Gran Escala. 25–27, 50, 51, 61
- LTE** *Long Term Evolution*, Evolución a Largo Plazo. 25, 31, 34, 58, 100
- LTE-A** *Long Term Evolution-Advanced*, Evolución a Largo Plazo Avanzada. 34, 47
- LTE-A PRO** *Long Term Evolution-Advanced Profesional*, Evolución a Largo Plazo Avanzada Profesional. 34, 47, 100
- M-MIMO** *Massive MIMO*, MIMO Masivo. 53, 54
- M2M** *Machine to Machine*, Máquina a Máquina. 49
- MAP** *Maximum a Posteriori*, Máximo "a Posteriori". 69
- MBB** *Mobile Broadband*, Banda Ancha Móvil. 43, 44
- MCMC** *Monte Carlo Markov Chain*, Cadenas de Markov Monte Carlo. 73
- MIMO** *Multiple-Input Multiple-Output*, Múltiples-Entradas Múltiples-Salidas. 31, 45, 50, 58, 68, 94
- ML** *Maximum Likelihood*, Máxima Verosimilitud. 69, 73, 74, 88
- MMSE** *Minimum Mean Square Error*, Mínimo Error Cuadrático Medio. 62, 88, 89, 93
- mmWave** *Millimeter Wave*, Onda Milimétrica. 31, 56
- MU-MIMO** *Multi User MIMO*, MIMO Multiusuario. 50–52
- NB-IoT** *Narrow Band IoT*, Banda Estrecha IoT. 34
- NR** *New Radio*, Nueva Radiofrecuencia. XV, 46, 47
- NSA** *Non-StandAlone*, No Autónomo. 47
- R-MCMC** *Randomize Monte Carlo Markov Chain*, Cadenas de Markov Monte Carlo Aleatorias. 74

- RTS** *Reactive Tabu Search*, Búsqueda Tabú Reactiva. 77, 78
- SCN** *Small Cell Networks*, Redes de Celdas Pequeñas. 31
- SD** *Spherical Detector*, Detector Esférico. 72
- SER** *Symbol Error Rate*, Tasa de Error de Símbolo. 93, 96
- SIC** *Successive Interference Cancellation*, Cancelación Sucesiva de Interferencias. 74, 93
- SM** *Spatial Multiplexing*, Multiplexación Espacial. 67, 68, 75
- SNR** *Signal to Noise Ratio*, Relación Señal a Ruido. 40, 96
- SU-MIMO** *Single User MIMO*, MIMO Monousuario. 51, 52, 54
- TDD** *Time Division Duplex*, Duplexación por División de Tiempo. 39, 52, 54
- TS** *Tabu Search*, Búsqueda Tabú. 77–79, 83, 88, 89, 93, 96, 101, 103, 106
- UDN** *Ultra Dense Networks*, Redes Ultra Densas. 44
- UE** *User Equipment*, Equipo de Usuario. 59
- VBLAST** *Vertical Bell-labs Layered Space-Time*, Sistema Vertical de Espacio-Tiempo de Laboratorios Bell. 67
- WRC** *World Radiocommunication Conference*, Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones. 46
- ZF** *Zero Forcing*, Forzado a Cero. 62, 88, 89, 93

Capítulo 1

Introducción

En los sistemas de comunicaciones las limitantes de ancho de banda y potencia son una oportunidad para la investigación y para el surgimiento de nuevas tecnologías. Una que recientemente ha ganado notoria atención en comunicaciones inalámbricas, es la tecnología conocida como Large MIMO o Massive MIMO (MIMO, *Multiple-Input Multiple-Output*) en la que múltiples antenas del orden de decenas a centenas se ubican especialmente en la estación base por factores de escala, en respuesta a que la demanda de capacidad y velocidad en las redes de datos inalámbricas se ha mantenido en permanente crecimiento y el espectro de radiofrecuencia asignado o disponible es limitado.

De esta forma L-MIMO aparece en el escenario como una opción para el logro de este objetivo convirtiéndose en uno de los pilares de lo que se ha denominado la quinta generación: 5G. MIMO se encuentra en tecnologías de uso actual como IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac y LTE que han hecho evidente sus beneficios, sin embargo, el trabajo con una gran cantidad de antenas es en el momento un foco de atención por los retos y beneficios que ofrece a la ingeniería de telecomunicaciones.

Aunque la mayoría de los sistemas MIMO actuales utilizan entre 2 y 8 antenas, L-MIMO propende por el aprovechamiento de las potencialmente grandes ganancias de capacidad que surgirían en matrices más grandes de antenas. L-MIMO proporciona beneficios sobre los sistemas MIMO convencionales, como: tasas de datos más altas, mayor confiabilidad, y una mejor relación entre la eficiencia espectral y la eficiencia energética. En L-MIMO, la transmisión de energía se puede optimizar mediante la explotación de los muchos grados de libertad que ofrece la gran cantidad de antenas, mientras que factores aleatorios como el ruido y la interferencia pueden ver disminuidas notoriamente sus efectos. Para que L-MIMO pueda tener un uso real, diversos retos deben ser abordados por la investigación. Particularmente el presente

trabajo se enfoca en la complejidad de procesamiento de señales requerido para la detección de señal, dado que, por definición, se está explotando un gran arreglo espacial, este proceso se vuelve bastante extenso al ser necesario operar sobre una elevadísima cantidad de permutaciones de símbolos posibles.

En este contexto, este proyecto propendió por investigar en algoritmos de baja complejidad para esquemas de detección en L-MIMO y diseñar esquemas de detección de prestaciones aceptables, de manera que el tiempo computacional haga viable su implementación en los sistemas de comunicaciones inalámbricos

1.1 Antecedentes

En los sistemas de comunicaciones las limitantes de ancho de banda y potencia son una oportunidad para la investigación y para el surgimiento de nuevas tecnologías. Una que ha ganado notoria atención en comunicaciones inalámbricas es la tecnología MIMO en la que múltiples antenas se ubican tanto en transmisión como en recepción. Como la demanda de velocidad en las redes de datos y en específico de las inalámbricas se ha mantenido en permanente crecimiento y el espectro de radiofrecuencia asignado o disponible es limitado, MIMO aparece en el escenario como una opción real para el logro de este objetivo y se encuentra en tecnologías de uso actual como IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac y LTE que la implementan haciendo evidente sus beneficios.

Recientemente la investigación se ha orientado a MIMO pero con arreglos de decenas o centenas de antenas que dentro de diversas formas de denominación usadas en la literatura se conoce como MIMO extenso (L-MIMO, Large MIMO) o MIMO Masivo (M-MIMO, Massive MIMO) (Larsson *et al.*, 2014) considerándola como una de las tecnologías que permitirá mayores capacidades y altas tasas de datos en las futuras redes inalámbricas (Mehmood *et al.*, 2013a).

En este escenario, una de las líneas de continua investigación trata la gran dificultad de implementación que para sistemas MIMO tiene la detección de señal en el extremo receptor, la cual es evidentemente mayor cuando se tienen sistemas con un gran número de antenas como ocurre en L-MIMO, por tanto, en la actualidad reviste gran interés la búsqueda de esquemas de detección cuyo costo computacional sea bajo de tal forma que facilite el aprovechamiento e implementación real de sus beneficios.

De esta forma, en esta Tesis se trabajó en el problema de la detección en sistemas MIMO cuando en las estaciones bases se emplea un gran número de antenas, es decir, en L-MIMO. Se han propuesto esquemas de detección de baja complejidad y prestaciones aceptables, de manera que el coste computacional haga viable su implementación, ofreciendo un aporte a las áreas de Procesamiento de Señal y Comunicaciones Inalámbricas.

1.2 Motivación y Alcance

Trabajar en el tema de L-MIMO y en específico sobre detección en L-MIMO, ofrece un escenario propicio para aplicar el procesamiento de señales a las comunicaciones inalámbricas. El tema de MIMO es actual y de uso real en redes cotidianas como WiFi IEEE 802.11n y 802.11ac, y su importancia para operadores móviles se evidencia en las implementaciones de HSPA+ y LTE. La tecnología L-MIMO deja entrever que tiene un alto potencial de proyección a futuro para poder atender la alta demanda de mayores velocidades de comunicación de datos por parte de los usuarios móviles.

En este contexto, para el desarrollo del presente trabajo se requirió hacer un estudio del funcionamiento algorítmico-matemático de las técnicas de detección actuales que sirven a MIMO y de las que se han planteado para L-MIMO que conduzca a la propuesta de un esquema que pueda ser considerado para su uso en L-MIMO, pues, no hay una técnica que sea la mejor y sirva para cualquier escenario, y los algoritmos más exactos son más complejos computacionalmente hablando, lo que llega a no hacer viable su implementación, por el contrario opciones sub-óptimas pueden ser más eficientes a la hora de considerar su costo computacional, y aún más, con la combinación de soluciones se podría conseguir un esquema viable de implementación, pero sin descuidar la complejidad que podría conllevar esta integración.

De esta forma la oportunidad se presentó porque la complejidad de los algoritmos actuales en especial los de mejor desempeño, dificultan su implementación con un gran número de antenas de tal forma que se pudo avanzar en el diseño de algoritmos sub-óptimos de bajo costo computacional.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Diseñar un esquema de detección L-MIMO para sistemas de comunicaciones inalámbricas

1.3.2 Específicos

- Establecer qué retos y beneficios ofrece la utilización de sistemas L-MIMO en la estación base.
- Definir las particularidades de los sistemas L-MIMO que orienten el diseño en los esquemas de detección frente a los convencionales de sistemas MIMO.
- Determinar qué técnicas de detección de baja complejidad se plantean en la actualidad para los escenarios de aplicación de estos sistemas.
- Proponer un esquema de detección L-MIMO de baja costo computacional para el escenario determinado.

1.4 Aportes

Los aportes de estas Tesis se encuentran en:

1. Abstracción de una metaheurística para aplicación a Detección en L-MIMO
2. Diseño y simulación del esquema de detección MMSE-TS
3. Diseño y simulación del esquema de detección ZF-TS
4. Mejoras al Ambiente de Simulación
5. Documentación

1.4.1 Abstracción de Metaheurística

En esta Tesis se ha abstraído el funcionamiento de la metaheurística de la Búsqueda Tabú (Glover y Laguna, 1997a) y se ha concebido la forma de aplicarla al proceso de detección de símbolos en L-MIMO, este proceso ha sido arduo y dispendioso por cuanto no se tuvo ningún referente ni se encontró una guía donde estuviera detallado. A diferencia de varias técnicas tradicionales de detección que efectúan procesos matemáticos explícitos que solamente requieren ser codificados.

Es muy diferente cuando una técnica tiene una forma matemática para llegar a un resultado a cuando se tiene que hacer un ejercicio de entender cómo funciona algo para poder introducir un proceso metaheurístico que establece unos pasos a seguir pero no dice específicamente cómo se implementa para cada caso particular.

1.4.2 Diseño y Simulación del Esquema de Detección MMSE-TS

Este es el aporte central de la Tesis y el que obedece al espíritu principal en este proceso de investigación. En la revisión del "Estado del Arte" se encontró que en los sistemas L-MIMO los detectores lineales y sus versiones de cancelación de interferencias, eran viables porque su complejidad ante el aumento en el número de antenas era manejable, por tanto, se tomaron como los referentes contra los cuales se debían evaluar los esquemas (algoritmos) de detección a generar.

De esta forma, una vez abstraída la metaheurística y habiendo concebido como se podía aplicar al proceso de detección en L-MIMO, la solución MMSE se estableció como la solución inicial alrededor de la cual definir un vecindario para que se diera el proceso de Búsqueda Tabú.

Con el esquema diseñado, hacer su codificación en MATLAB fue otro reto que demandó tiempo, conocimiento y esfuerzo hasta lograr que lo que se había establecido estuviera coherentemente programado.

Como se verá en el capítulo 6, el desempeño obtenido frente al tiempo de cómputo requerido por este detector, es excelente, especialmente en 4QAM, convirtiéndose en un aporte claro de esta Tesis.

1.4.3 Diseño y Simulación del Esquema de Detección MMSE-ZF

En una forma similar al aporte anterior, se exploró el uso de ZF como solución inicial alrededor de la cual establecer el vecindario para la búsqueda. Como aspecto intere-

sante este fue el primer esquema de detección que se planteó, y por los resultados obtenidos se tuvo la motivación de proceder a revisar el uso de MMSE.

Con este esquema implementado pudo pasarse a la evaluación comparativa y así tener dos grupos de detectores: los de ZF y los de MMSE. Como se verá más adelante, el desempeño de este esquema de detección para ser bueno necesita de más iteraciones lo cual aumenta el tiempo de cómputo y se salía de la directriz sobre baja complejidad.

Sin embargo, se pudo establecer que para órdenes bajos de antenas y con 4QAM el desempeño que tenía era mejor frente a los de su mismo grupo.

1.4.4 Mejoras en el Ambiente de Simulación

En el marco del desarrollo de la Pasantía Internacional se tuvo la oportunidad de conocer y evaluar formas de hacer simulación de L-MIMO, entre las que particularmente el paquete desarrollado entre la Universidad de Sevilla y la Universidad Carlos III de Madrid tenía muchas ventajas. Los aportes que se le hacen al Ambiente de Simulación con el desarrollo de esta Tesis, se detallan a continuación:

- Se agregaron dos nuevos detectores: MMSE-TS y ZF-TS.
- Se le construyó una Interfaz Gráfica para facilitar la puesta en funcionamiento y selección de los detectores a evaluar, la modulación y la cantidad de antenas a utilizar.
- Se implementó una Barra de Progreso con la intención de saber que la simulación continuaba en ejecución y no se había bloqueado el equipo, y para proyectar el tiempo que podría tomar obtener resultados, lo cual es particularmente útil para simulaciones que toman varios días y hasta semanas.

1.4.5 Documentación

El tema de MIMO y particularmente el de Detección en MIMO y más aún en L-MIMO, en una palabra "espanta" a las nuevas generaciones, para las que temas como el desarrollo de apps e IoT posiblemente generan más interés que el procesamiento de señales, la abstracción de metaheurísticas o la programación en MATLAB. En este sentido y con el ánimo de presentar el tema de esta Tesis en una forma agradable que

lo volviera motivante, se estableció una estructura que llevara desde lo más general e interesante hasta lo más específico y posiblemente complejo.

1.5 Principales Resultados

Los resultados del proceso de desarrollo de esta Tesis se pueden clasificar en tangibles e intangibles, como se detallan a continuación.

Resultados Tangibles

1. Publicaciones
2. Trabajos de Grado
3. Software

Resultados Intangibles

4. Redes Académicas
5. Programación en MATLAB
6. Escritura de Documentos en \LaTeX

1.5.1 Publicaciones

En el marco de los estudios de Doctorado en Ciencias de la Electrónica se generaron las siguientes 4 publicaciones:

P1 Guefry Leider Agredo Méndez, Pablo Emilio Jojoa Gómez, Vicenç Almenar Terré, "Búsqueda Tabú aplicada a detección de símbolos en L-MIMO" Revista Entramado ISSN: 1900-3803 v.13 fasc.2, 2017.

P2 Guefry Leider Agredo Méndez, Pablo Emilio Jojoa Gómez, Vicenç Almenar Terré, "Aplicación de un Algoritmo Basado en Propagación de Esperanzas para Detección de Símbolos en Sistemas L-MIMO" Revista Gerencia Tecnológica Informática - GTI ISSN: 1657-8236 v.14 fasc.39, 2015.

P3 Guefry Leider Agredo Méndez, Pablo Emilio Jojoa Gómez, Vicenç Almenar Terré, "Sistemas MIMO con un elevado numero de antenas: clave para la 5G inalámbrica". Revista Entramado ISSN: 1900-3803 v.11 fasc.2, 2015.

P4 Guefry Leider Agredo Méndez, Pablo Emilio Jojoa Gómez, Vicenç Almenar Terré, "L-MIMO: Un Gran Número de Antenas hacia 5G".

Ahora bien, como los resultados más importantes fueron los obtenidos con el Esquema de Detección MMSE-TS, se elaboró un artículo para revista JCR con índice de impacto.

P5 Guefry Leider Agredo Méndez, Pablo Emilio Jojoa Gómez, Vicenç Almenar Terré, "An Effective Hybrid MMSE-Tabu Search based Algorithm for Symbol Detection in Large MIMO Systems" Revista JCR.

Adicionalmente y con fines de divulgación directa ante la comunidad académica y publicación rápida de resultados cuasi-finales, se participó con el siguiente artículo en el IEEE COLCOM 2017 el cual se puede consultar en IEEE Xplore.

P6 Guefry Leider Agredo Méndez, Pablo Emilio Jojoa Gómez, Vicenç Almenar Terré, "Application of Tabu Search based Algorithms for Symbol Detection in L-MIMO Systems" COLCOM 2017, Pendiente publicación en IEEE Explore.

1.5.2 Trabajos de Grado

Con la intención de continuar en la investigación en el área se tiene el planteamiento o la dirección de los siguientes trabajos de posgrado y pregrado:

TGM1 Diego Fernando Uribe Ante "Diseño de un Esquema de Detección en L-MIMO con variaciones de Tabu Search". Propuesta de Trabajo de Grado de Maestría, Universidad del Cauca, Director Guefry Agredo Méndez.

TG1 Carlos Armando UI Dorado y Brayan Nicolás Cañar Paz "Implementación de un Sistema de Comunicaciones MIMO 2x2 sobre dispositivos de Hardware Reconfigurable USRP". Trabajo de Grado, Universidad del Cauca, Director Guefry Agredo Méndez.

TG1 Jhon Alexander Munoz Lache y Cristian Camilo Arguello Guevara "Evaluación del Desempeño de Detectores MIMO en diversos Ambientes de Simulación". Propuesta de Trabajo de Grado, Universidad del Cauca, Director Guefry Agredo Méndez.

1.5.3 Software

Los Esquemas de Detección que se diseñaron en esta Tesis, fueron programados en MATLAB ampliando el conjunto de detectores del Ambiente de Simulación sobre el que se trabajó. La Interfaz Gráfica con la que se dotó al mismo facilita la configuración de las opciones de simulación que se pueden llevar a cabo y la barra de progreso permite saber que la simulación se encuentra en proceso y proyectar el tiempo que requerirá. Lo anterior puede proyectarse a una mayor difusión considerando hacer su inclusión en el *File Exchange* de MathWorks.

1.5.4 Redes Académicas

Un resultado que favorece la proyección y la generación de trabajo conjunto, es la red de contactos académicos que se ha generado en el marco del desarrollo de esta Tesis de Doctorado. Particularmente en Colombia queda tácitamente una Red de Investigación en Telecomunicaciones, entre otras con: Universidad de Antioquia, Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, Universidad ICESI, Universidad del Quindío, Universidad Autónoma de Occidente, Universidad Distrital y Universidad de Nariño. En España con: Universidad Politécnica de Valencia, Universidad Miguel Hernández, Universidad de Sevilla, Universidad Carlos III de Madrid y la Universidad de Granada.

1.5.5 Programación en MATLAB

Algo que se buscó aprovechar en este tiempo de estudio fue aumentar el grado de conocimiento sobre MATLAB, lo cual se considera logrado. Esto por cuanto en la labor docente en pregrado y posgrado era importante contar con un nivel de conocimiento superior en el mismo, pues, en mucho es la herramienta a la cual se recurre para la obtención de resultados en diversos escenarios académicos y de investigación.

1.5.6 Escritura de Documentos en \LaTeX

Hasta el inicio de estos estudios de Doctorado, nunca se había tenido la necesidad y menos la "imposición" de tener que escribir un documento haciendo uso de esta herramienta. Lo que comenzó con sufrimiento, ante el cambio en la forma de trabajo cuando se ha estado en el paradigma del MS Word, ahora se agradece, pues, se entienden las ventajas del uso de \LaTeX .

Ya se puede decir que se pertenece al culto que en ocasiones pareciera existir en el campo de las ingeniería en Electrónica o en Telecomunicaciones, en el que se considera que es la herramienta que se debe usar, porque de lo contrario es como si no se hubiera hecho el proceso completo y no se perteneciera a ese "selecto grupo de los que escribieron en \LaTeX su documento".

1.6 Organización del Documento

Partiendo de lo indicado en la sección 1.4.5, el documento se encuentra estructurado de la siguiente manera:

En el capítulo 2 se presente la quinta generación inalámbrica 5G, haciendo referencia a cinco de sus pilares, uno de los cuales es MIMO con gran cantidad de antenas (L-MIMO).

En el capítulo 3 se detallan las tecnologías asociadas a L-MIMO, es decir, MIMO Masivo, MIMO de Dimensiones Completas y MIMO de Gran Escala o Alto Orden, al final del cual se establecen los retos y beneficios que ofrece la utilización de sistemas L-MIMO.

En el capítulo 4 se entra en el detalle del reto sobre el cual se trabajó en esta Tesis: la Detección de Símbolos en L-MIMO, donde se inicia con la especificación del problema de la detección, luego se presentan las propuestas de detectores que se plantean en la actualidad para L-MIMO y se finaliza con la explicación sobre los detectores que se usan como referencias para efectos de comparación de desempeño.

En los tres capítulos anteriores se hace la revisión del estado actual del conocimiento en: 5G inalámbrica, L-MIMO y detección en L-MIMO, respectivamente.

En el capítulo 5 se encuentra el Diseño de los Esquemas de Detección propuestos, iniciando con la explicación de la Búsqueda Tabú y el porqué de haberla escogido para luego hacer la aplicación de esta metaheurística a la detección de símbolos en L-MIMO.

El capítulo 6 trata lo relacionado con la selección el Ambiente de Simulación, la descripción del mismo y los aportes que se le realizaron, para luego proceder a presentar los resultados de simulación con su análisis respectivo.

Finalmente, en el capítulo 7 se consignan las conclusiones y los trabajos futuros.

Adicionalmente se cuenta con tres anexos:

En el Anexo A se tiene el código en MATLAB de los Esquemas de Detección MMSE-TS y ZF-TS Propuestos, donde particularmente se puede apreciar la codificación de la Búsqueda Tabú aplicada a la detección de símbolos en L-MIMO, fruto de la abstracción de la metaheurística y de la programación en MATLAB, para llevarla a ser operativa en este contexto.

En el Anexo B, se relacionan resultados adicionales para otros niveles de MIMO y L-MIMO con modulaciones 4QAM y 16QAM.

En el Anexo C, se hace la presentación de la metodología de simulación que se tuvo como referente, y cuyo seguimiento, condujo a la generación del contenido que se encuentra en los capítulos 5 y 6.

Capítulo 2

Hacia la Quinta Generación Inalámbrica - 5G

Las nuevas tecnologías que se han expandido por todo el mundo han generado a lo largo de los años nuevos avances para los protocolos de conexión móvil, es decir, los métodos usados para la transferencia de datos entre los dispositivos se han ido adecuando o adaptando a las necesidades que han surgido, cambiando sus especificaciones de funcionamiento para lograr por ejemplo, altas velocidad de transmisión, una entre tantas mejoras que se han conseguido desde que apareció la primera generación (1G) hasta el presente, donde ya se cuenta con Evolución a Largo Plazo (*LTE, Long Term Evolution*).

Ahora, la demanda de altas velocidades y el aumento de tráfico para servicios que requieren una conexión estable y de gran velocidad como lo son: las videollamadas, videos de alta definición, sincronización con la nube, telemedicina, entre otros, han exigido trabajar en procura de una nueva generación que pueda soportar esas grandes demandas, es así como surge el camino hacia la quinta generación (5G) inalámbrica.

En este capítulo se presentan los diferentes requerimientos y diversos métodos necesarios para la implementación de la 5G, entre los cuales se encuentran las cinco nuevas tecnologías que deberán unirse para dicha implementación: Ondas milimétricas (*mmWave, Milimeter Waves*), Redes de Celdas Pequeñas (*SCN, Small Cell Networks*), MIMO Masivo (*Massive MIMO*), Conformación de Haces (*Beamforming*) y *Full duplex*. Se da a conocer lo que la tecnología de quinta generación implica y las oportunidades y avances que se pueden generar con ella.

2.1 Escenarios de 5G

5G es la quinta generación para las redes de conmutación de paquetes incorporando nuevas tecnologías en infraestructura, flujo de datos con mayor densidad de usuarios

y aplicaciones que requieran baja latencia, dirigiendo este *release* a su versión número 15 (3GPP, 2017) abarca un espectro grande para la transmisión en bandas de frecuencia altas, lo cual con lleva a una mejor prestación de servicios, además, se da soporte una amplia gama de aplicaciones para las velocidades de transmisión del orden de los Gbps.

La idea de la tecnología 5G inalámbrica surge a raíz de la demanda de altas velocidades y grandes capacidades por partes de los usuarios, pues a medida que pasa el tiempo, existen más usuarios y más dispositivos móviles en el mundo que deben ser atendidos con las satisfacción total de sus necesidades.

En la actualidad no existe un concepto exacto sobre lo que abarca 5G, pero las expectativas se encuentran en una tecnología que trabajando en velocidades del orden de los Gbps (Andrews *et al.*, 2014b) es capaz de soportar mucho más tráfico que el que se maneja hoy en día e implica una alta densidad de estaciones base y antenas. Se espera además, que sea una tecnología que se encuentre disponible para 2020.

Existen distintas organizaciones o proyectos que promueven la generación de tecnologías para soportar la 5G, como se muestra en la figura. 2.1.



Figura 2.1. Organizaciones 5G

Todos las anteriores concuerdan en algunos requisitos que son necesarios para hablar de una tecnología 5G en sí, los cuales son (Ayscom, 2015):

- Tasas pico mayores a 10 Gbps.

- Tasas mínimas de 100 Mbps garantizadas en todo lugar.
- Latencia ultra baja menor a 5 ms.
- Eficiencia energética extrema: baterías con enorme duración.
- Densidades de conexión altas del orden del millón de usuarios por Km^2 .
- Conectividad de todo con todo.

Desde principios de 2012, la ITU-R se embarcó en un programa para desarrollar "*IMT for 2020 and beyond*", preparando el escenario para las actividades de investigación 5G a escala global. Recientemente el grupo de trabajo responsable de los Sistemas IMT ha establecido los requisitos clave para el desempeño de 5G en IMT-2020, de tal forma que debe proporcionar comunicaciones ultra-rápidas y de alta velocidad para banda ancha e IoT (ITU, 2017).

Ahora bien, en una manera más específica, 5G tiene como objetivo cumplir cinco diferentes escenarios, que han sido establecidos en el proyecto Europeo *METIS* (Habilitadores de las Comunicaciones Móviles e Inalámbricas para la Sociedad de la Información 2020 - *Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-Twenty (2020) Information Society*).

El conjunto de los escenarios, proporcionan los retos que deben cumplirse para el desarrollo de la tecnología, y que son las principales métricas que definirán el marco de estandarización.

A continuación se describe cada uno de estos escenarios.

Escenario 1: Altas velocidades

Se refiere a lo que se mencionó anteriormente de trabajar a altas velocidades del orden de los Gbps, sin percibir retardos. Para poder alcanzar dicho objetivo es necesario el uso de portadoras con mayor ancho de banda en nuevos rangos de frecuencias, junto con diferentes tecnologías que logren conseguirlo.

Escenario 2: Excelente servicio para multitudes

Lo que se busca es ofrecer anchos de banda razonables para los diferentes lugares que así lo requieran (estadios, clínicas, centros comerciales, entre otros), para lograr que el usuario tenga en todo momento una buena conexión así se encuentre en un

lugar con abundante afluencia de personas.

Escenario 3: Comunicación entre dispositivos ubicuos

Se busca realizar la gestión de dispositivos a desplegar, pues, estos tienen diferentes requerimientos dependiendo del tipo que sean, por ejemplo, existen algunos de baja complejidad como sensores y otros de alta complejidad como dispositivos multimedia de alta definición y dispositivos médicos, así que el objetivo es distinguir el tipo de dispositivo para brindarle el servicio necesario.

Escenario 4: Buena experiencia en movimiento

Esto implica que la conexión no debe perderse aunque el usuario se encuentre en movimiento, por lo cual se espera tener sistemas eficientes de traspaso entre celdas, más cuando el número de las mismas se debe aumentar considerablemente. Para proveer la mejor experiencia a usuarios y dispositivos con alta movilidad, se necesitan soluciones de conectividad robustas y fiables, así como la habilidad de hacer una gestión eficiente.

Escenario 5: Conexión fiable y en tiempo real

El objetivo de este escenario es contemplar la necesidad de una mayor fiabilidad y una menor latencia, que permitan responder de forma efectiva a los requerimientos del servicio que hace uso de la red.

2.2 Estandarización del 3GPP en camino a 5G

El Proyecto de Asociación para la Tercera Generación (3GPP, *3rd Generation Partnership Project*) trabaja en el *release* 15 para atender los requisitos de IMT-2020, de tal forma que va progresivamente pasando por *releases* previos como los que han permitido alcanzar los ítems especificados para LTE Avanzado (LTE-A, *LTE Advanced*) con lo cual se espera el paso a LTE Avanzado Pro (LTE-A PRO, *LTE Advanced Pro*).

Este marco de estandarización del 3GPP relacionando los *releases* con los nombres que se han establecido para la evolución de LTE, las capacidades tecnológicas y los logos en el camino hacia 5G se aprecian en la figura 2.2 (Qualcomm, 2016).

Con la aprobación del *release* 13 realizada en octubre 22 de 2015 en el 3GPP por

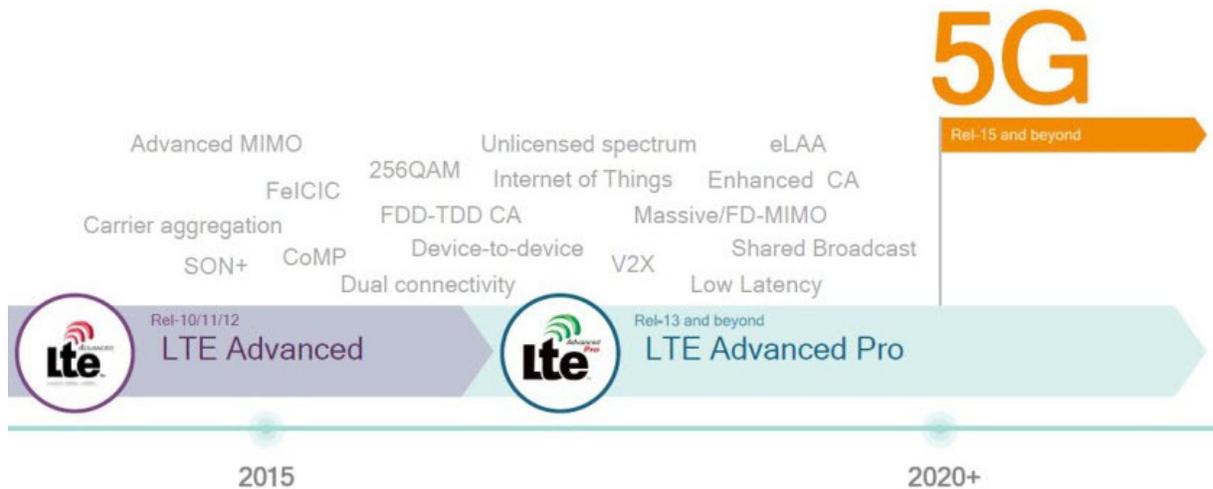


Figura 2.2. Estandarización 3GPP hacia 5G

el Grupo de Coordinación del Proyecto (PCG, *Project Coordination Group*) se contemplan entre otros, los siguientes avances (3GPP, 2015): Redes de Celdas Pequeñas (SCN, *Small Cell Networks*), agregación de portadoras mejorada, interworking con Wi-Fi, Acceso Asistido a Licencia (LAA, *Licensed Assisted Access*) en 5 GHz, posicionamiento *indoor*, Banda Estrecha IoT (NB-IoT, *Narrow Band IoT*), Vehículo a Todo (V2X, *Vehicle to Everything*), Comunicaciones de Tipo Máquina Mejoradas (eMTC, *Enhanced Machine Type Communication*), reducción de latencia y la que más interesa para los fines de este documento: FD-MIMO.

Estas características se acogen de forma natural y con el suficiente nivel de madurez en este *release* 13 convirtiéndolo en un nuevo marcador que se ubica en 4.5G en la evolución de LTE hacia 5G (Ghadialy, 2015).

Particularmente para el contexto de desarrollo de esta Tesis el avance más importante es la aprobación para el uso en LTE Avanzado Pro de MIMO de Dimensiones Completas (FD-MIMO, *Full Dimension MIMO*) pues, como se explicará en el siguiente capítulo, esta tecnología es la que trae a la realidad práctica el aprovechamiento de los beneficios MIMO Masivo al contar con una gran cantidad de antenas en la estación base.

2.3 Tecnologías que Soportan 5G

Como se mencionó anteriormente existen cinco nuevas tecnologías que deberán unirse para lograr el desarrollo de la quinta generación (Osseiran *et al.*, 2016). Las cuales, se

muestran en la figura 2.3 (Wong *et al.*, 2017).

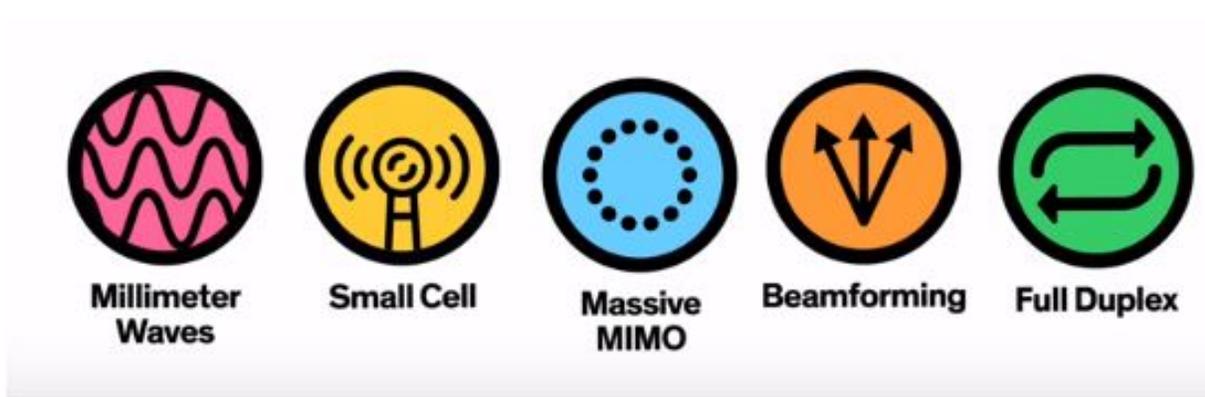


Figura 2.3. Tecnologías que soportan 5G

- Ondas Milimétricas (*Millimeter Waves*)

Los dispositivos móviles comunes usan frecuencias muy específicas del espectro de radiofrecuencia las cuales típicamente se encuentran en la banda de 3 kHz hasta 6 GHz; pero en consecuencia, como es una banda relativamente pequeña se ha saturado, pues, las portadoras solo pueden manejar cierta cantidad de dispositivos al tiempo y en esta situación la calidad del servicio empieza a disminuir, porque será más probable la caída del mismo o se hará presente una disminución en la velocidad.

Para dar solución a dicho problema (5G planea hacerlo), se propone el uso de las Ondas Milimétricas (mmWave, *Millimeter Wave*). Lo que se plantea hacer es usar la banda de Frecuencias Extremadamente Altas (*EHF, Extremely High Frequency*) que abarca desde 30GHz hasta 300GHz, la cual es una banda mucho más extensa pero que no ha sido usada por sistemas móviles, aunque según expertos y los últimos estudios realizados, es posible hacer un uso efectivo de ella (Rappaport *et al.*, 2014) (Rappaport *et al.*, 2013).

Si lo anterior se da, se tendría una banda con mucha más capacidad, lo cual implicaría que todos los dispositivos tendrían ancho de banda a su disposición como se muestra en la figura. 2.4

El principal inconveniente del uso de esta tecnología es que las ondas milimétricas no pueden traspasar grandes obstáculos como edificios o árboles y además

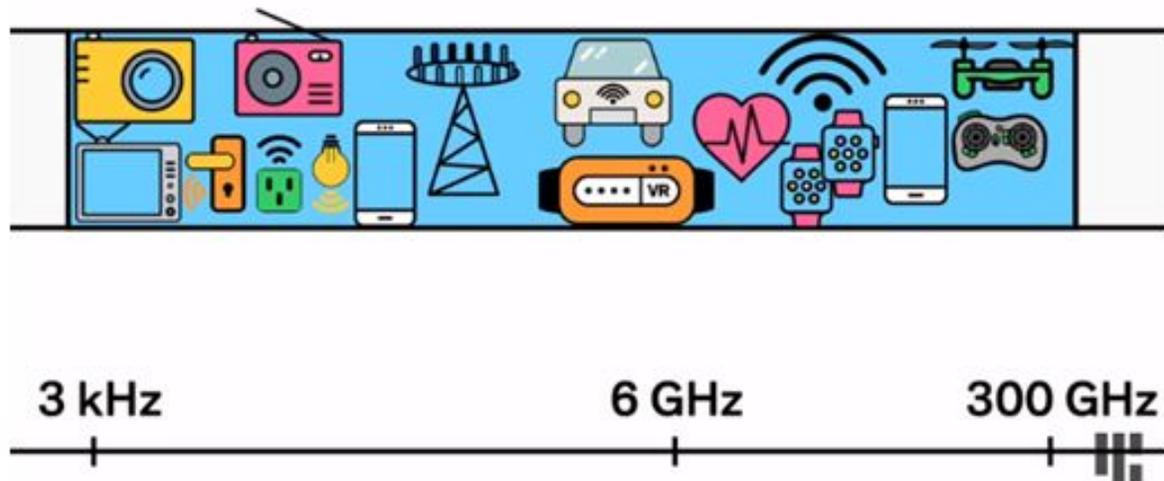


Figura 2.4. Nueva Banda Disponible

pueden ser absorbidas por la lluvia. Para solucionar dicho problema es necesario el uso de la tecnología que se describirá a continuación.

- Redes de Celdas Pequeñas (*Small Cell Networks*)

Las redes de celdas pequeñas aparecen en 5G para lograr el uso de ondas milimétricas (Jungnickel *et al.*, 2014), que como se mencionaba anteriormente, estas no son efectivas traspasando obstáculos. Las redes como se conocen hoy en día, usan celdas de gran tamaño relativo y antenas de alta potencia para la radiodifusión a largas distancias, como se muestra en la figura 2.5.

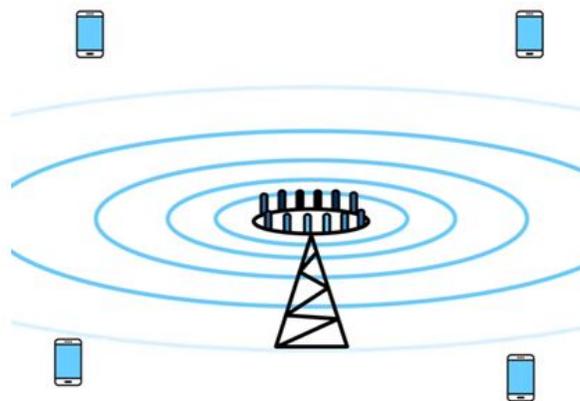


Figura 2.5. Redes Actuales

Pero si se desea hacer uso de ondas milimétricas, con esa infraestructura no sería posible, pues, si se encuentran obstáculos en el camino, como el caso de una ciudad, la onda no sería capaz de traspasarlos y nunca habría conexión para los dispositivos como se muestra en la figura 2.6.

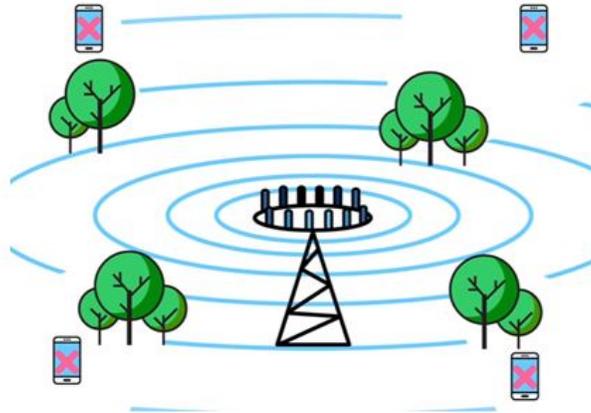


Figura 2.6. Redes Actuales con Ondas Milimétricas

Para dar solución a lo anterior, se propone crear nuevas redes de celdas pequeñas (Jungnickel *et al.*, 2014), creando estaciones base de tamaño reducido, que se encuentren cerca una de la otra, o más cerca de lo que habitualmente se tendría para brindar cobertura a todos los dispositivos, de tal forma que si el usuario se encuentra en movimiento, su dispositivo conmute a la celda que brinde mejor cobertura en el momento. En la figura 2.7, se puede apreciar una red de pequeñas celdas, donde se encuentran pequeñas estaciones base que funcionan en conjunto para dar cobertura a todos los dispositivos.

- MIMO Masivo (*Massive MIMO*)

Hoy en día la infraestructura de la tecnología 4G, posee estaciones base que soportan pocas antenas, pues, se tiene un espacio limitado para ubicar simultáneamente las antenas directivas. Para implementar la tecnología 5G es necesario disponer de múltiples antenas para garantizar mayor capacidad, es por eso que se dispone de la tecnología de MIMO masivo (Maciel Barboza *et al.*, 2015), la cual se refiere al uso de una gran cantidad de antenas, soportando decenas de

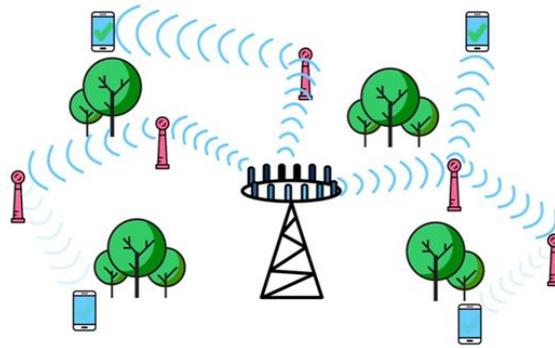


Figura 2.7. Red de Celdas Pequeñas

ellas. En la figura.2.8 (Ayscom, 2017) se compara de manera gráfica la diferencia entre la infraestructura utilizada para 4G y la que es necesaria para 5G.

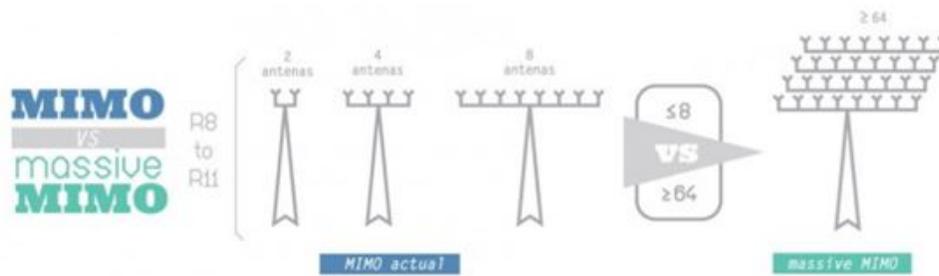


Figura 2.8. Comparación MIMO y MIMO masivo

En MIMO masivo se debe atender a múltiples dispositivos al mismo tiempo y frecuencia, y se requiere un funcionamiento con Duplexación por División de Tiempo (*TDD, Time Divide Duplex*).

La desventaja de MIMO masivo es la interferencia, ya que las antenas de hoy en día emiten la información o señal en todas las direcciones todo el tiempo, por lo cual como se observa en la figura2.9 se genera una alta interferencia.

Para mitigar el problema de la interferencia y atender de una forma más enfocada a los usuarios, 5G debe hacer uso de la tecnología *Beamforming*, la cual se explicará a continuación.

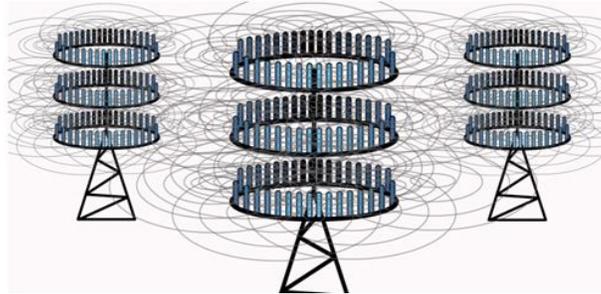


Figura 2.9. Interferencia presente en MIMO masivo

- Formación de Haces (*Beamforming*)

Beamforming es una técnica que mediante la formación de haces ayuda a que exista un enfoque sobre el receptor ayudando a mitigar el problema de interferencia en MIMO masivo facilitando la operación multi-usuario, al permitir que la celda envíe la señal de manera directa al usuario que se requiere como se muestra en la figura 2.10

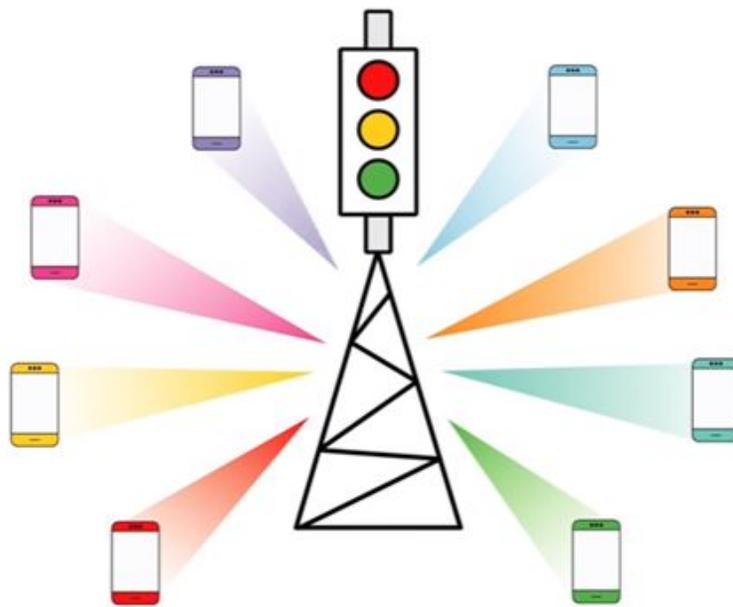


Figura 2.10. Redes Actuales con Ondas Milimétricas

Beamforming es una técnica de procesamiento de señal, donde múltiples ele-

mentos de antena están adaptados en fase para formar haces concentrados y directivos. Esta técnica puede ser implementada tanto en el transmisor como en el receptor con el fin de proporcionar ganancias de antena significativas y maximizando así la Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal-Noise Ratio*) y otros márgenes adicionales en el radioenlace que mitigan las pérdidas de propagación. (Roh *et al.*, 2014a)

Funciona enviando múltiples señales desde la estación base MIMO masivo, y analiza las señales que obtiene de regreso desde los dispositivos; así la infraestructura, es capaz de determinar el mejor camino que debe tomar la señal para alcanzar al dispositivo del usuario. Para realizar todo el proceso, es necesario del uso de algoritmos de procesamiento de señal que coordinen la señal transmitida a través de la red, por más de una antena a la vez, y permitir que se pueda determinar la posición exacta del dispositivo, lo cual a su vez mejora la intensidad de la señal.

La tecnología *Beamforming*, es muy útil para ambientes urbanos donde el grado de interferencia es más alto, con lo que los dispositivos tendrán una mayor cobertura garantizando una señal mejorada.

- Fullduplex

Hoy en día la comunicación móvil utiliza el modo dúplex, lo que indica que una antena solo puede realizar una tarea al tiempo, transmitir o recibir, esto gracias a la reciprocidad de las ondas radio que tienden a viajar en ambos sentidos por la misma frecuencia, entonces, si se realiza la recepción y transmisión al tiempo se ocasionaría interferencia.

La nueva tendencia para 5G, es el modo *fullduplex* (Zhang *et al.*, 2015), en el cual un dispositivo transmite y recibe al mismo tiempo y en la misma frecuencia. El principal reto tecnológico para implementar el modo *fullduplex* es conseguir evitar la interferencia, además, para ello deberán ser modificados los dispositivos de red y de usuario.

El potencial de la utilización de *fullduplex* en cuanto al aumento de capacidad del sistema es tan grande que lo convierte en una tecnología muy importante para el futuro de las redes móviles.

Una desventaja de esta tecnología, es que crea interferencia por medio de ecos; cuando un transmisor envía una señal, esta llega con alta potencia al receptor del dispositivo, así que para implementar un modo *fullduplex* es necesario una tecnología especial de cancelación de ecos.

La figura 2.11 (Ayscom, 2017) presenta los escenarios de uso de *IMT-2020* establecidos en la Recomendación ITU-R M.2083, con sus tres vértices relacionados con: ancho de banda celular mejorado, comunicación ultra confiable de baja latencia y comunicación masiva entre máquinas.

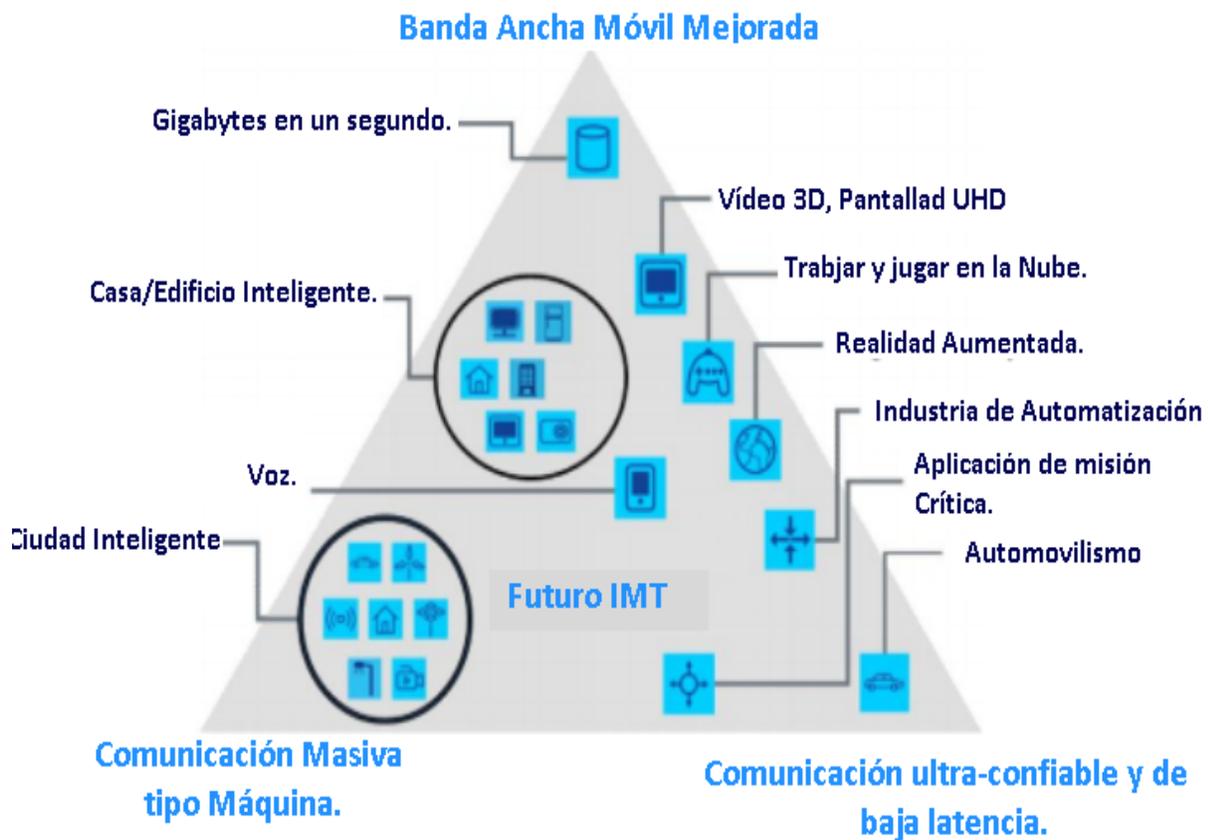


Figura 2.11. Escenarios de uso para IMT-2020

Las capacidades clave de IMT-2020 con respecto a las de IMT-Advanced establecidas en la misma recomendación y que son objeto de investigación hoy día, se resumen en:

Se espera que la tasa máxima de datos de IMT-2020 para banda ancha móvil alcance 10 Gbps aunque podría llegar a soportar inclusive hasta 20 Gbps. IMT-2020 soportaría diferentes tasas de datos, por ejemplo, para casos de cobertura de área amplia (áreas urbanas y suburbanas) se espera que se habilite una velocidad de datos experimentada por el usuario de 100 Mbps. En los casos de *hotspots* se espera que la velocidad de datos experimentada por el usuario alcance valores más altos del orden de 1 Gbps.

Se espera que la eficiencia espectral sea tres veces mayor en comparación con IMT-Advanced para banda ancha móvil mejorada. El aumento alcanzable de la eficiencia de IMT-Advanced variará entre escenarios y podría ser mayor en algunos. Como dato nominal se espera que IMT-2020 soporte capacidad de tráfico de área de $10 \text{ Mbps}/\text{m}^2$, en ambientes de *hotspots*.

El consumo de energía para la red de acceso de radio IMT-2020 no debería ser mayor que el que se tienen para las redes IMT desplegadas en el momento. Por lo tanto, la eficiencia energética de la red debería mejorarse por un factor comparable con el aumento de la capacidad de tráfico prevista para IMT-2020 en relación con IMT-Advanced.

IMT-2020 debería ser capaz de proporcionar latencia de 1 ms capaz de soportar servicios con requisitos de muy baja latencia. Se espera que IMT-2020 posibilite movilidades del orden de los 500 km/h manteniendo la calidad en el servicio, lo cual es especialmente importante para casos como el de los trenes de alta velocidad.

Finalmente, se espera que IMT-2020 admita una densidad de conexión de hasta $10^6/\text{km}^2$, por ejemplo, en escenarios de comunicación masivos de tipo máquina.

La figura 2.12 reúne estos elementos resaltando de manera visual la comparación entre IMT-2020 e IMT-Advanced.

2.4 Estrategias para Espectro 5G

2.4.1 Ancho de Banda Celular Mejorado

La mejora busca extender los servicios de Banda Ancha Móvil (MBB, *Mobile Broadband*) existentes y proveer comunicaciones versátiles que soporten nuevas aplicaciones que requieran altas tasas de datos, baja latencia y una experiencia de usuario más uniforme en el área de cobertura. Las tasas de datos deberán alcanzar hasta el orden de Gbps para ajustarse a los requerimientos que demandan aplicaciones como

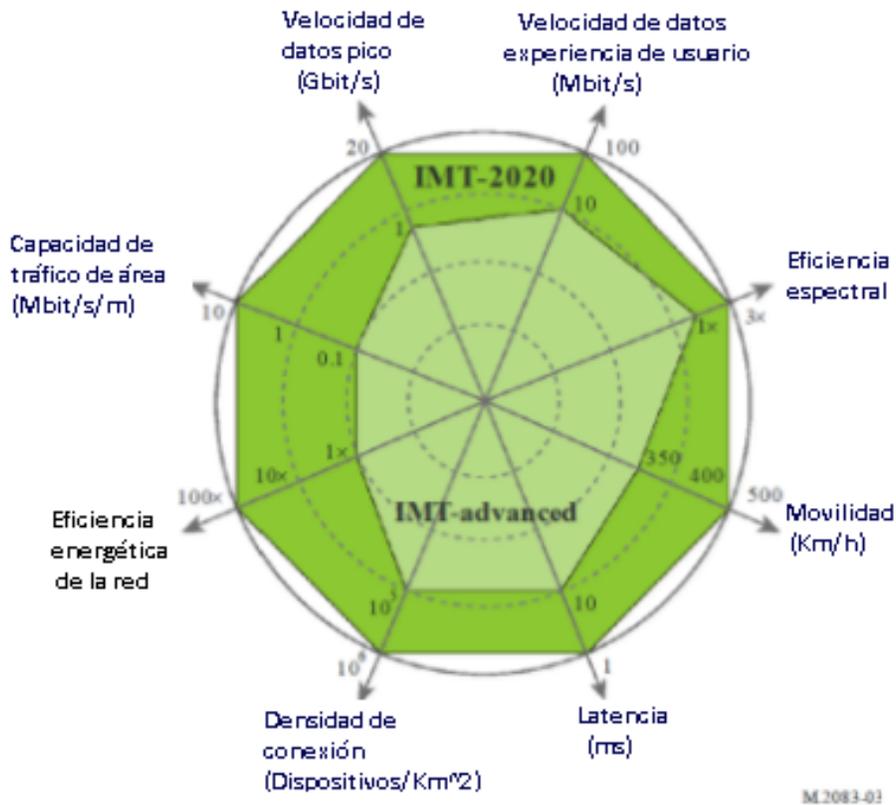


Figura 2.12. Capacidades clave de IMT-2020 vs IMT-Advanced

la realidad aumentada o virtual, el video en *streaming* de *ultra-HD* y además, combinado con la baja latencia será clave para la Internet táctil. Igualmente importante resulta obtener una tasa moderada fiable en cualquier punto de la celda (Ayscom, 2017). Entre las soluciones clave para poder implantar redes *xMBB* figuran:

- Disponibilidad de nuevo espectro: totalmente indispensable para cumplir con los requisitos de tráfico, al disponer de mayor espectro y aplicar técnicas flexibles y eficientes para la utilización del mismo. En la figura 2.13 (SearchDataCenter, 2017) se aprecia como se distribuye el espectro para la 5G.
- Nueva interfaz radio para redes densificada: en *xMBB* se considera una densificación importante en línea con las Redes Ultra Densas (*UDN, Ultra Dense Networks*). Como consecuencia el número de usuarios activos por nodo será menor y estará menos sobrecargado, pudiendo ofrecer tasas de pico mayores.
- Eficiencia espectral y sistemas de antena avanzados: la técnica más promete-

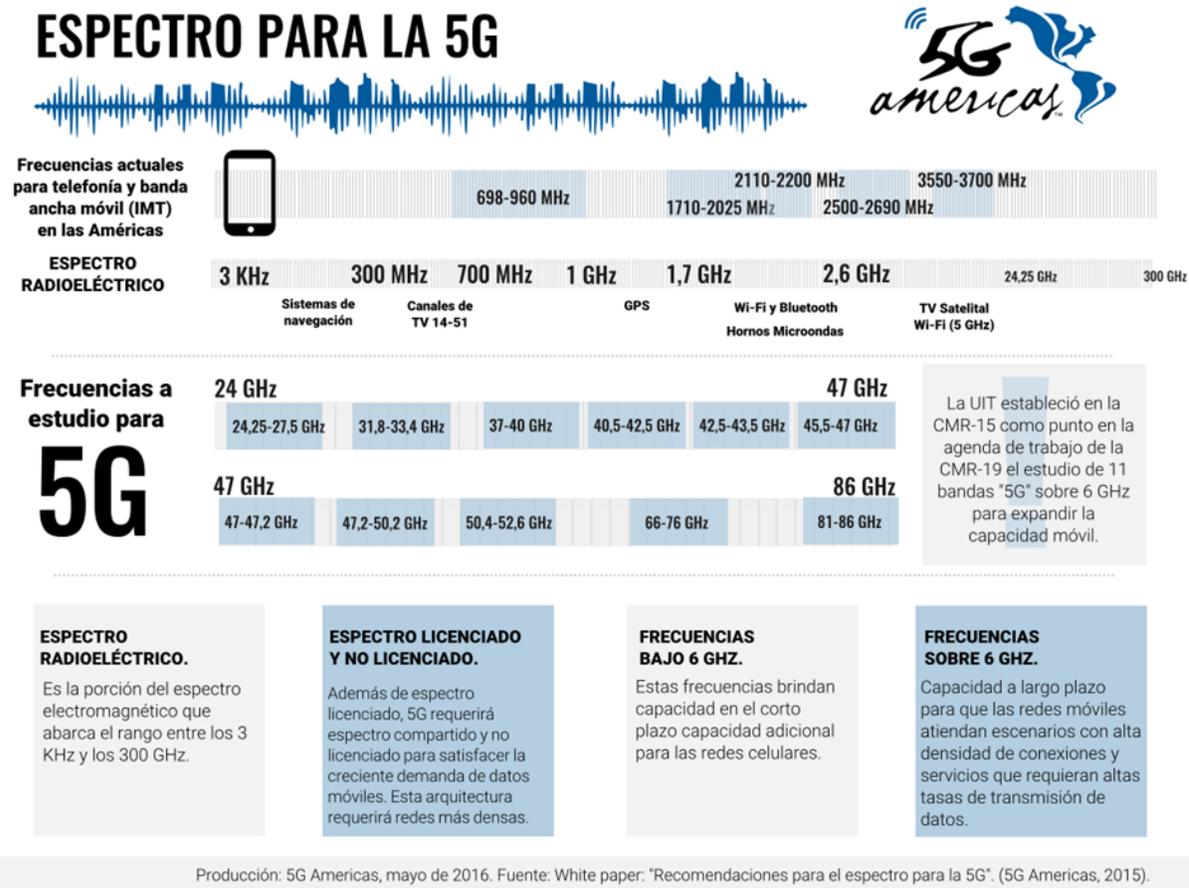


Figura 2.13. Espectro para la 5G

dora para lograr una mejora espectral sustancial es MIMO Masivo, particularmente FD-MIMO.

2.4.2 Espectro Nuevo para 5G

Varias novedades acerca del espectro para 5G han salido a la luz por parte de 3GPP que ha adelantado estudios en cuanto a la banda no licenciada y el espectro compartido. El 3GPP se está centrando en el espectro no licenciado para analizar más a fondo en este campo, además de la estandarización de nuevos rangos de frecuencia para trabajar hasta los 60 Ghz, estudio que es encabezado por *Qualcom* y otros asociados y se ejecutará a principios del 2018 (Qualcomm, 2017b).

Lo anterior se encamina hacia el uso de un espectro más grande con anchos de banda extensos para incorporar servicios de mayor calidad lo cual solo se puede esperar utilizando la banda no licenciada, el denominado *Multifire* y el Acceso Asistido a Licencia

(LAA, *Licensed Assisted Access*) que incorporan nuevos enfoques, particularmente el denominado: *MultiFire* el cual actúa de forma autónoma o *Stand-alone* lo cual hace referencia a que no necesita espectro con licencia y permite que *Small Cells* operen únicamente en espectro sin licencia.

De esta forma se amplía el ecosistema LTE a entidades que no pueden poseer espectro con licencia: algunos proveedores de servicios de Internet y propietarios de empresas. *MultiFire* también beneficia a los operadores de redes móviles (titulares de espectro con licencia primaria), proporcionándoles nuevas oportunidades de implementación para hacer *offloading* y aumentar sus redes móviles. Los elementos anteriores se resumen en la figura 2.14 (Qualcomm, 2017b).

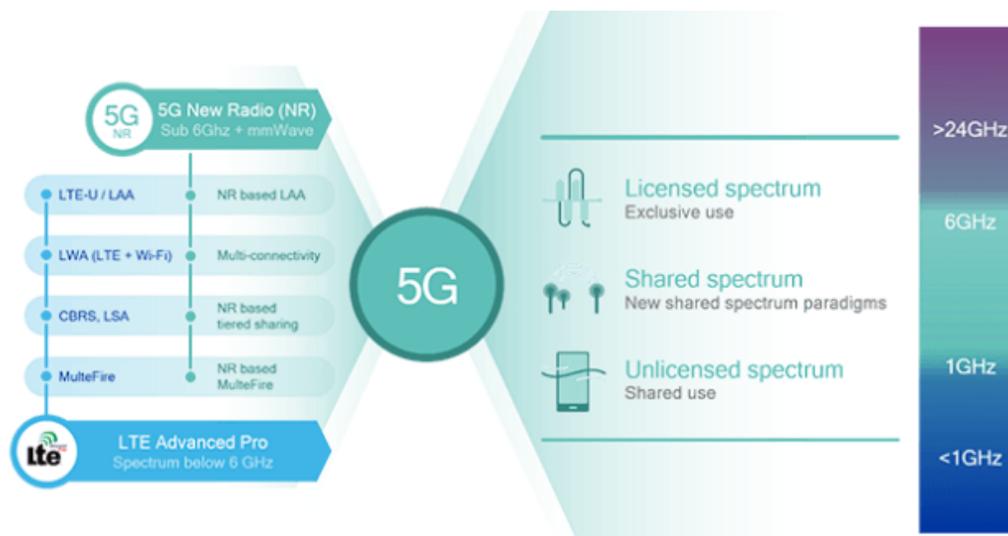


Figura 2.14. Soporte de 5G NR para nuevos espectros y bandas

La LAA es una función LTE que aprovecha la banda sin licencia de 5 GHz en combinación con el espectro con licencia para ofrecer un aumento en el desempeño para los usuarios de dispositivos móviles. Al agregar una nueva opción de acceso y utilizar los principios de Escuchar Antes de Hablar (LBT, *Listen Before Talk*), LAA optimiza los recursos disponibles de la red inalámbrica y mejor la cobertura para todos los usuarios, ya sea que sus dispositivos utilicen LAA, celular con licencia o Wi-Fi. LAA es un hito clave en el camino hacia 5G, aprovechando una combinación de espectro licenciado y sin licencia, y el uso de bandas de frecuencia más altas en una arquitectura de celda pequeña, la figura 2.15 ilustra esta capacidad (Qualcomm, 2016).

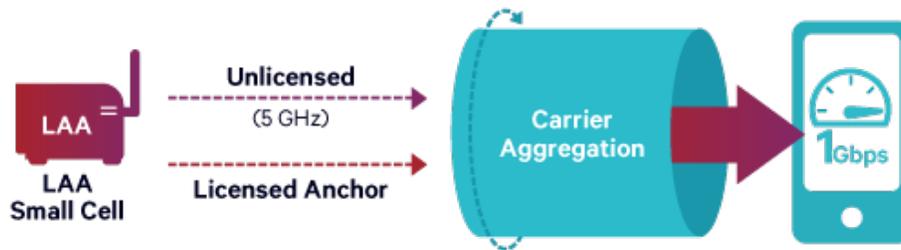


Figura 2.15. Acceso Asistido a Licencia

2.4.3 No Autónomo 5G

En las últimas Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones (WRC, *World Radiocommunication Conference*) se han establecido pautas para las tecnologías emergentes de 5G además de estándares, por ahora se pasa de hablar de 5G Red de Núcleo (*5G Core Network*) a 5G Nueva Radiofrecuencia (NR, *New Radio*) lo cual mueve el rumbo de las empresas y de las normativas tomadas por *3GPP* para estandarizar 5G.

En pro de mitigar la no escalabilidad de las tecnologías soportadas en 4G las cuales no pueden migrar a 5G se lanzó No-Autónomo 5G NR (NSA, *Non-standalone*) (Qualcomm, 2017a), concepto que permite aprovechar los espectros y frecuencias utilizadas para 4G con una portadora adicional de acceso radio para propósitos de 5G. *Non-standalone* permite a las empresas y países con infraestructura plena de 4G dar un salto a *LTE-A PRO*, soportando en la red *LTE-A*; lo cual permite hacer pruebas en sistemas 4G para 5G, como se ve en la Figura 2.16 (Daniels, 2017).

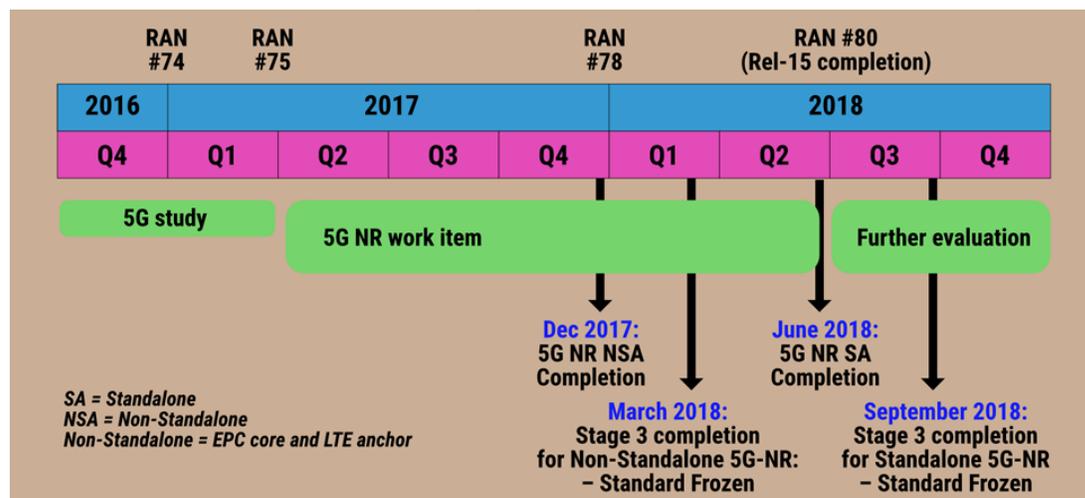


Figura 2.16. Proceso de estandarización para 5G NR

Capítulo 3

Sistemas MIMO con Gran Número de Antenas

La explosión de los datos móviles ha conllevado a la búsqueda de mayores velocidades para satisfacer las demandas de servicios como videollamadas, video móvil de alta definición y sincronización de fotos y videos de móviles; de igual forma la proliferación de dispositivos como *tablets*, *smartphones* y *gadgets*, hace necesaria una mayor capacidad en las redes, sean fijas como WiFi 802.11n/ac (Nasir *et al.*, 2014) o móviles como HSPA+ o LTE, inclusive se ha necesitado de desbordamientos de la red móvil en redes WiFi con estrategias como la denominada *WiFi Offload* (Sraga *et al.*, 2014), que se traduce en un crecimiento exponencial del tráfico particularmente en el entorno móvil lo que se aprecia en reportes como el pronóstico global de datos móviles de Cisco (Cisco, 2017) donde se prevén estadísticas para 2021 tales como: que el tráfico de datos móviles globales mensuales será de 49 exabytes por mes presentado en la figura 3.1, que el tráfico móvil anual superará la mitad de un zettabyte, que el número total de teléfonos inteligentes será de más del 50% por ciento de los dispositivos y conexiones globales y que más del 78% del tráfico de datos móviles a escala mundial será video.

De esta forma, iniciativas como el Proyecto METIS (Osseiran, 2013) buscan responder a las proyecciones de crecimiento en aspectos como volúmenes de datos móviles (x 1000), velocidades de usuario (x100), duración de baterías (x10), número de dispositivos conectados (x100) para atender las demandas de tráfico de las futuras comunicaciones y en especial las de tipo Máquina a Máquina (M2M, *Machine-to-Machine*) en las que millones de dispositivos inteligentes se interconectarán en escenarios tales como: Sistemas Inteligentes de Transporte, *Smart Grid*, Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*), e-salud y Domótica, entre otros; para los que la capacidad y velocidad de las redes actuales será insuficiente (Mehmood *et al.*, 2013b).

Lo anterior ha conminado a la búsqueda de soluciones tecnológicas que puedan

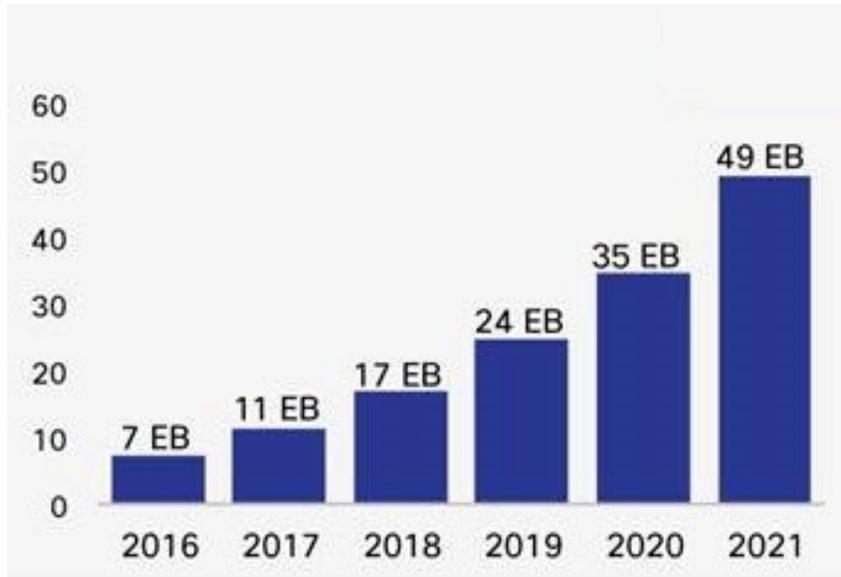


Figura 3.1. Tráfico de datos móviles para 2021

hacerle frente a esta necesidad, las cuales se han recogido en la quinta generación móvil o 5G (Andrews *et al.*, 2014a).

En el panorama mundial, una de las soluciones para atender las necesidades planteadas se soporta en el empleo de la tecnología de múltiples antenas el transmisor y en el receptor conocida como de Múltiple-Entrada Múltiple-Salida (MIMO, *Multiple-Input Multiple-Output*), pero con el uso de un elevado número de antenas.

El empleo de MIMO en tecnologías como WiFi, HSPA+ y LTE ha permitido mejorar en gran medida la fiabilidad del enlace, aumentar la capacidad general del sistema y elevar la velocidad para la transferencia de datos. MIMO se ha utilizado en diversos estándares de comunicación inalámbrica de tercera generación (3G) y cuarta generación (4G). Aunque la mayoría de los sistemas MIMO actuales utilizan arreglos de 2x2 hasta 8x8 antenas, como se explicó en el capítulo anterior, en el marco de poderle hacer frente a los requisitos para la 5G se tienen las propuestas de aumentar el número de antenas las cuales tienen como objetivo aprovechar las grandes capacidades y mayores velocidades que surgirían con estos volúmenes (con decenas o cientos de antenas).

En este nuevo paradigma en el que se tienen sistemas MIMO con un gran número de antenas se debe diferenciar entre dos tipos (Yang y Hanzo, 2015):

- MIMO Masivo (M-MIMO, *Massive MIMO*)

- MIMO a Gran Escala (LS-MIMO, *Large Scale MIMO*)

El primer sistema (MIMO masivo) corresponde al caso en el que el número de los usuarios activos es mucho menor que el número de antenas en la estación base a diferencia del segundo caso (MIMO a gran escala) en donde el número de los usuarios activos es comparable al número de antenas que se encuentran en la estación base, cabe destacar como consecuencia del efecto combinado del crecimiento del tráfico móvil de datos y la escasez de espectro radioeléctrico favorable en la gama de frecuencias de baja pérdida, la quinta generación (5G) debe recurrir al empleo de éstos sistemas para lograr una alta eficiencia espectral y alta eficiencia energética (Yang y Hanzo, 2015) explotando la dimensión espacial mediante el empleo de diferentes mecanismos de codificación y/o decodificación, en donde se hace una diferenciación en el manejo del enlace ascendente (*Uplink*) y el enlace descendente (*Downlink*).

Estos sistemas han despertado un gran interés en la comunidad académica y científica, que como indicó en el capítulo anterior se proyectó como una de las tecnologías para 5G, sin embargo, la realidad de implementación práctica de esta tecnología, al menos en el mediano plazo, se aprecia particularmente con la que se ha denominado MIMO de Dimensiones Completas (FD-MIMO, *Full-Dimensions MIMO*).

El segundo sistema se perfila para servir en el escenario de *backhaul* soportando los enlaces entre el núcleo (*core*) y las subredes de acceso de los usuarios o para enlaces de gran distancia punto a punto.

Estos sistemas proporcionan una gran cantidad de ventajas sobre los sistemas MIMO convencionales, como tasas de datos más altas, mayor fiabilidad de enlace, y un mejor equilibrio entre la eficiencia espectral y la eficiencia energética.

En estos sistemas la transmisión de energía se puede optimizar mediante la explotación de los muchos grados de libertad ofrecida por los muchos elementos de antena, mientras que problemas aleatorios como el ruido térmico y la interferencia co-canal disminuyen su impacto notablemente.

En el presente capítulo, se hace la revisión de las tecnologías MIMO Masivo (y particularmente MIMO de Dimensiones Completas) y MIMO a Gran Escala, indicando al final los retos y beneficios que se tienen con la utilización los mismos.

3.1 MIMO Masivo

MIMO Masivo (M-MIMO, *Massive MIMO*) se refiere al uso de una gran cantidad de antenas en la estación base para atender a múltiples equipos de usuario en el mismo intervalo de tiempo-frecuencia, pensado para funcionar con Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time-Division Duplex*) combinado con pilotos en el *uplink* que permitan realizar la Estimación del Estado del Canal (CSI, *Channel State Estimation*) teniendo en cuenta la interferencia entre celdas, la sobrecarga y los errores relacionados con la información del estado del canal, soportándose sobre una base asintótica en el límite de un número infinito de antenas, matemáticamente se llega a una serie de conclusiones que apuntan a atender de manera efectiva las expectativas de los sistemas 5G (Marzetta, 2015). Particularmente se minimizan los efectos del ruido no correlacionado y del desvanecimiento rápido, la velocidad efectiva en la celda aumenta, el número de terminales no limita el tamaño de las celdas, la eficiencia espectral es independiente del ancho de banda y se disminuye la energía requerida por bit (Marzetta, 2010).

En este sistema sólo el receptor está equipado con un gran número de antenas ya que es quien está proyectado para ser la Estación Base (BS, *Base Station*), mientras que el número total de antenas activas en el lado de transmisión es significativamente menor. Por lo tanto, la configuración de antena de este sistema puede ser caracterizado con la ecuación 3.1 (Yang y Hanzo, 2015)

$$\lim_{N_r \rightarrow \infty} \frac{N_t}{N_r} = 0 \quad (3.1)$$

Mientras al inicio los estudios se centraron en los enlaces de SU-MIMO donde dos dispositivos con múltiples antenas se comunican entre sí, el enfoque se ha desplazado en los últimos años hacia sistemas prácticos de MIMO Multi-usuario (MU-MIMO, *Multiuser MIMO*), donde típicamente una estación base con múltiples antenas sirve simultáneamente a un conjunto de usuarios donde la ganancia de multiplexación puede ser compartida por todos los usuarios. De esta manera, sólo se necesita equipamiento costoso en la estación final del enlace y los terminales de usuario pueden ser dispositivos relativamente económicos como se puede observar en la figura 3.2 (Yang y Hanzo, 2015). Además, debido a la diversidad multiusuario, el rendimiento de los sistemas MU-MIMO es generalmente menos sensible al ambiente de propagación que en el caso MIMO punto a punto (Lu *et al.*, 2014).

Un sistema de MIMO Masivo es un sistema multiusuario en el que algunos disposi-

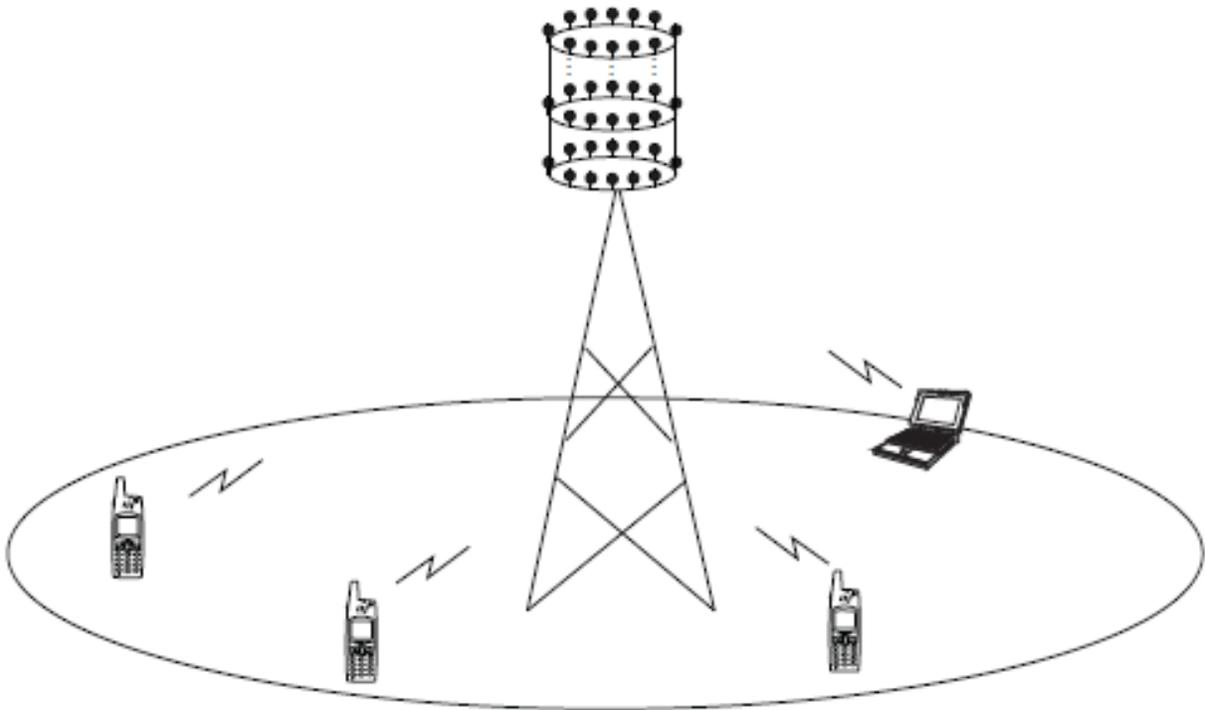


Figura 3.2. Ejemplo de MIMO masivo (Estación base y dispositivos)

tivos están transmitiendo simultáneamente aprovechando las múltiples antenas.

Dado que el número de antenas en la estación base es significativamente mayor que el número de usuarios, hay disponibles un gran número de grados de libertad y pueden ser usados para formar o transformar la señal transmitida de una manera amigable al *hardware* o para anular la interferencia. Una ventaja de M-MIMO radica en su eficiencia de energía potencial en comparación con una única antena. En (Lu *et al.*, 2014) se muestra que cada usuario puede reducir su potencia de transmisión proporcionalmente al número de antenas en la BS con perfecta Información de Estado del Canal (CSI, *Channel State Information*) para obtener el mismo rendimiento de un sistema SU-MIMO.

Ya que en M-MIMO el número de antenas en la estación base puede ser significativamente mayor que el número total de antenas en estación móvil se da una configuración muy desequilibrada, lo que resulta en un alto orden de diversidad de recepción, por eso, uno de los requisitos más importantes de M-MIMO es que la estación base debe tener un buen conocimiento del canal de propagación en ambos sentidos, en el que los pre-codificadores de enlace descendente y los detectores de enlace ascen-

dente puedan basarse.

Por lo anterior, los sistemas de MIMO Masivo se fundamentan en la reciprocidad de canal y Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time Division Duplexing*) ya que permite la estimación del estado del canal a través de los pilotos del enlace ascendente teniendo en cuenta la interferencia entre celdas y posibles errores de información (Edfors *et al.*, 2016).

Los postulados establecidos por (Marzetta, 2010) requieren un número infinito de antenas en la estación base, pero en la práctica esto no es posible, el hecho de acomodar decenas o centenas de las mismas ya representa un reto para el diseño y para la realidad práctica comercial, en especial en bandas inferiores a los 6 GHz, sin embargo, a diferencia de los sistemas 4G en los que hay un espacio limitado para acomodar antenas directivas acimutalmente y el uso de SU-MIMO se encuentra restringido por el número limitado de antenas que se pueden acomodar en los dispositivos móviles, en M-MIMO la estaciones base son las que se encargan de la gran cantidad de antenas y el uso de TDD permite la estimación del estado del canal a través de los pilotos del *uplink* por la reciprocidad del mismo, además se prevé el reemplazo de las estaciones base actuales con sistemas con una gran cantidad de antenas de baja ganancia y montajes tales como arreglos planares que se puedan ubicar en las fachadas de los edificios (Boccardi *et al.*, 2014); de esta forma ha ganado eco en la comunidad científica global y en organismos muy representativos como el 3GPP, convirtiéndose en un nicho importante para la investigación con repercusiones en estandarización.

La importancia que exhibe MIMO Masivo para lograr las metas de 5G se evidencia en el hecho que desde hace alguno años diferentes eventos mundiales de alta importancia y reconocimiento dediquen su programa o al menos una sesión (*track*) del mismo a tratar el tema y porque el potencial tecnológico del uso del gran número de antenas ha logrado impulsar el desarrollo de implementaciones reales para obtener datos reales que permitan llevar la tecnología a la práctica y convertirla en una realidad, favoreciendo procesos como la prueba de algoritmos y del diseño de circuitos. Estos bancos de pruebas (*testbeds*) que mejoran el entendimiento general de la tecnología y hacen evidente sus beneficios, se convierten en prueba del concepto, lo que favorece su aceptación con fines de estandarización. De esta forma con la coordinación de la Universidad de Rice en Texas y el aporte de la Universidad de Yale, Bell Labs, Alcatel-Lucent y Google, se encuentra el *testbed* conocido como Argos el cual demostró con un prototipo inicial de 64 antenas el aumento de 10 veces en la capacidad del sistema

frente a uno estándar (Shepard *et al.*, 2013), este es un proyecto realizado en fases y en la actualidad cuenta ya con un arreglo de 96 antenas (Talbot, 2014) sobre el que se está soportando la experimentación. En la figura 3.3 se pueden apreciar el montaje del arreglo de antenas de Argos en la fase reciente.

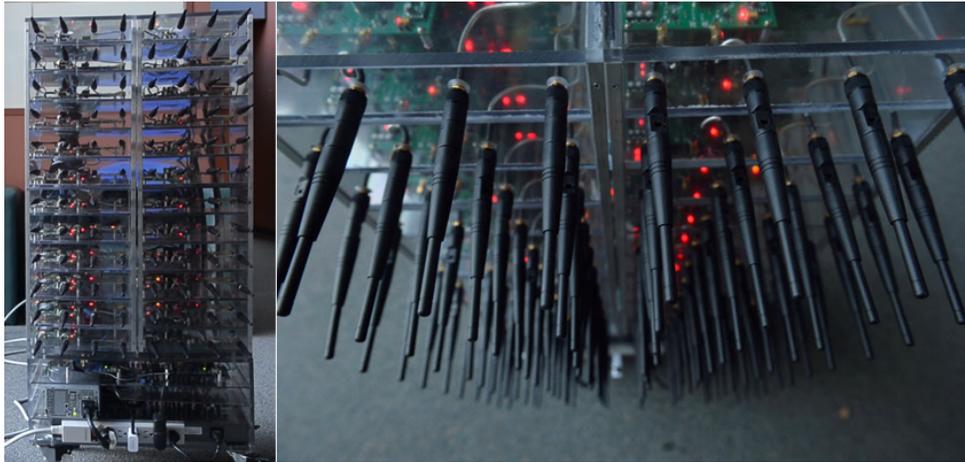


Figura 3.3. Arreglo Masivo de 96 Antenas: Argos

Por su parte bajo la coordinación del Departamento de Tecnología Eléctrica y de la Información de la Universidad del Lund y el aporte de la Universidad de Linkopings en Suecia, se ha venido trabajando en la construcción de *testbeds* con arreglos de más de 100 elementos de antena; de este trabajo sobresalen dos prototipos: uno es el arreglo circular de 128 antenas con frecuencia central de 2,6 GHz cuyo montaje real sobre un edificio de la Universidad de Lund se puede apreciar en la figura 3.4 (Flordelis *et al.*, 2015) con el cual ha sido posible demostrar que incluso los usuarios en condiciones de línea de vista que se encuentren situados próximos uno del otro reciben los beneficios de MIMO Masivo.

El otro es el arreglo rectangular plano escalable de 128 a 160 antenas con frecuencia central de 3,7 GHz que cuenta con el apoyo de National Instruments, y al cual se le conoce como el LuMaMi (Lund University Massive MIMO) *Tesbed*. Se encuentra dispuesto como un panel de 60 cm x 120 cm que como se aprecia en la figura 3.5 (Luther, 2014) se parece en tamaño a un televisor de pantalla plana de 55 pulgadas, que perfectamente puede ser ubicado en la terraza o fachada de un edificio.

Entre las características que se destacan de este *testbed* se tienen: es escalable, se encuentra construido sobre hardware actual, trabaja con anchos de banda usuales de 20 MHz, la pre-codificación y decodificación MIMO en tiempo real se distribuye a



Figura 3.4. Prototipo en arreglo circular de 128 antenas sobre la Universidad de Lund

través de 50 FPGAs Xilinx Kintex-7 interconectadas con PCI-Express, logrando una elevada velocidad de procesamiento de datos en banda base del orden de 384 Gbps tanto en la transmisión como en la recepción y ofreciendo una arquitectura de baja latencia en la estimación del canal para efecto de pre-codificación del orden de 500 micro segundos (Vieira *et al.*, 2014).

Los anteriores bancos de pruebas, han permitido considerar retos adicionales para la implementación práctica de MIMO Masivo, entre otros: la cantidad de Conversores de Analógico a Digital (ADC, *Analog-to-Digital Converter*) que se requieren por cada antena, su interconexión, las velocidades de procesamiento de los mismos, y el diseño, espacio y distribución para acomodar tanta cantidad de antenas (Luther, 2015); este último aspecto es uno de los que ha llevado a considerar el desarrollo de la tecnología de MIMO Masivo en frecuencias de las mmWave (Swindlehurst *et al.*, 2014) (Talwar *et al.*, 2014) por el tamaño considerablemente más reducido de las antenas, y los enormes anchos de banda que se consiguen en este rango de frecuencias que aunque históricamente ha sido considerado inconveniente para uso en redes móviles celulares por problemas de propagación que llevan a alcances más cortos y restricciones para cobertura sin línea de vista, en la actualidad los estudios realizados sobre estas ondas las han ubicado en el escenario y las han convertido en candidatas para atender las



Figura 3.5. Prototipo LuMaMi en arreglo rectangular escalable de 128/160 antenas

demandas de 5G (Rappaport *et al.*, 2013) (Zhang *et al.*, 2017) (Roh *et al.*, 2014b) (Karjalainen *et al.*, 2014) como se presentó en el capítulo anterior.

3.2 MIMO de Dimesiones Completas

Con la misma intención de responder al rápido crecimiento del tráfico de datos generado por los dispositivos móviles y los desafíos para la capacidad de las redes móviles, el 3GPP introdujo las tecnologías de MIMO y MIMO multi-usuario para su uso en LTE y en LTE Avanzado y de esta forma lograr el aumento en la eficiencia espectral.

En las redes LTE actuales el nodo B evolucionado (eNb, *evolved Node B*) normalmente cuenta con un arreglo lineal de antenas dispuesto en forma acimutal por lo que el eNB aprovecha la diversidad espacial en el eje horizontal.

MIMO de Dimensiones Completas (FD-MIMO, *Full Dimension MIMO*) por su parte introduce adicionalmente antenas en el eje vertical (Nam *et al.*, 2013) lo que le permite al eNB contar con diversidad en los dos ejes, especialmente en el dominio de elevación, razón por la cual también se le conoce como de Conformación de Haz de Elevación

(EBF, *Elevation BeamForming*), de esta manera acomoda un gran número de antenas que se organizan en un panel con arreglo en dos dimensiones (2D) para establecer enlaces espacialmente separados con los dispositivos móviles. El arreglo 2D no solo posibilita la atención con haces dirigidos hacia arriba o hacia abajo, sino que además, habilita que el dominio del acimut (*azimuth beamforming*) también puede ser explotado y así atender a los equipos de usuario que se encuentren hacia izquierda o derecha del eNb, como se ilustra en la figura 3.6 (Xu *et al.*, 2014).

La idea es usar portadoras con inclinación específica hacia los equipos de usuario y la conformación de haces de ancho variable, con lo cual se logra aumentar la calidad del enlace y reducir la interferencia intra e inter celda traduciéndose en mayores tasas de datos o aumento de la cobertura en especial en el borde de la celda (Kim *et al.*, 2014).

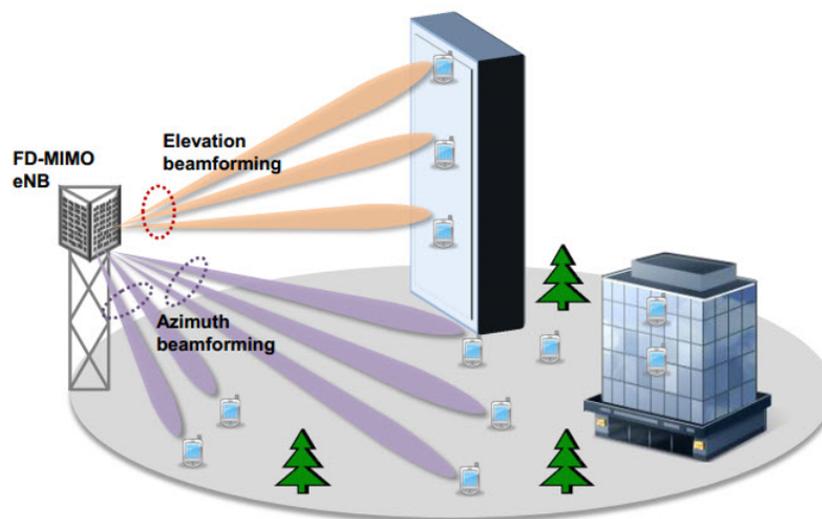


Figura 3.6. eNB con soporte para FD-MIMO

La estandarización actual del 3GPP para implementación trata MIMO con hasta 8 antenas, pero el trabajo con FD-MIMO se orienta al soporte de bloques de 16, 32 y hasta 64 (de aquí la relación con MIMO Masivo) lo que se vuelve un límite en LTE, pero se considera que se volverá aún más relevante con el uso de frecuencias más altas en el futuro donde los elementos de antena puedan ser miniaturizados y aumentar el número de los mismos para permitir órdenes de centenares y aprovechar aún más los beneficios de lo masivo.

Como resultado de esta consideración, el *release 13* del 3GPP para *LTE Advanced Pro* incluye las siguientes características principales (Lee y Kwak, 2016):

- FD-MIMO para un aumento considerable de la eficiencia espectral mediante el uso de una gran cantidad de antenas en la estación base, se prevé inicialmente el uso de arreglos con 32 antenas y luego con 64.
- LAA para la utilización de espectro sin licencia en conjunto con espectro licenciado, a la vez que garantiza la coexistencia con dispositivos existentes.
- *Multifire* para que LTE trabaje únicamente en espectro sin licencia.
- Agregación de Portadoras, en un número significativo del orden de 32.

FD-MIMO depende en gran medida del avance de las tecnologías de procesamiento de señal y es una de las tecnologías candidatas clave para poder cumplir los requisitos de la evolución de los sistemas celulares 4G a 5G.

La idea clave detrás de FD-MIMO es utilizar una gran cantidad de antenas colocadas en un panel de antenas de dos dimensiones (2D) para formar haces estrechos en las direcciones horizontal y vertical. Dicha conformación de haces permite que un eNB realice transmisiones simultáneas a múltiples Equipos de Usuario (UE, *User Equipment*), combinando *Beamforming* y multiplexación espacial de alto orden.

La figura 3.7 representa un eNB con FD-MIMO implementado, utilizando un panel de arreglo de antena 2D, donde cada antena es un elemento activo que permite la precodificación dinámica y adaptativa en todas las antenas. Al utilizar dicha precodificación, el eNB puede dirigir simultáneamente transmisiones en los dominios de acimut y elevación para múltiples UE. FD-MIMO es una característica clave en la mejora del rendimiento del sistema con su capacidad de realizar multiplexación de alto orden.

Para poder explotar como es debido los beneficios de la conformación de haces mejorada y la multiplexación espacial de FD-MIMO los eNB que implementen esta tecnología deben trabajar en escenarios que posibiliten una mejora en el desempeño del sistema. Los escenarios ideales son aquellos en los que se deben orientar los haces con desplazamiento vertical, en la práctica muchos de los equipos de usuarios se encuentran en los diferentes pisos de los edificios de apartamentos o de oficinas, por lo cual es evidente el nicho para la tecnología. Otro escenario importante es aquel donde se tiene una elevada concentración de usuarios como en centros comerciales, estadios, teatros, salas de conciertos, aeropuertos, estaciones de trenes o de buses; en estos sitios es notoria la mejora que ofrecería el sistema FD-MIMO al poderse realizar transmisiones para múltiples usuarios soportadas en el arreglo de antenas 2D

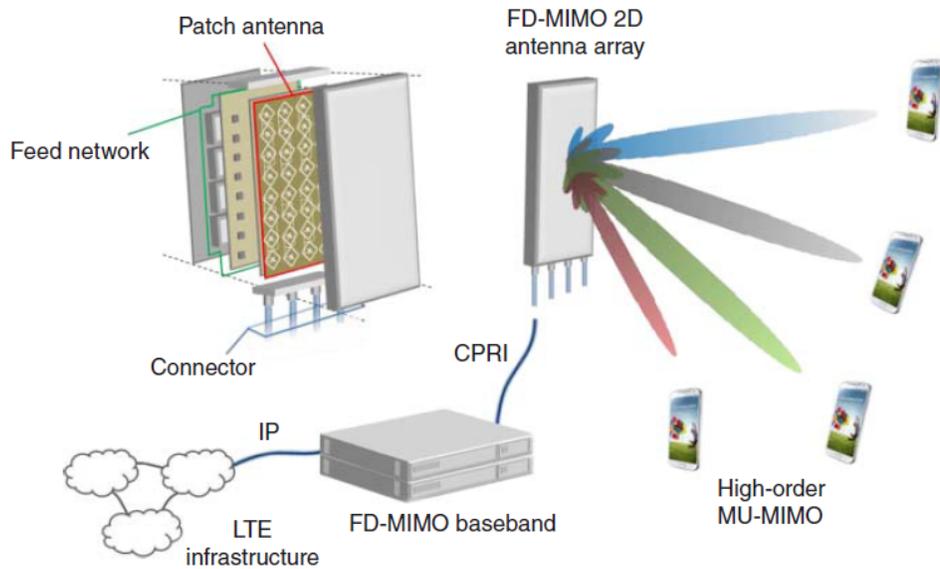


Figura 3.7. FD-MIMO con MU-MIMO

tomando ventaja de la direccionalidad de los haces, así podrían entonces, aparecer instalaciones en las que los arreglos de antenas se ubicarán en el techo del sitio con haces apuntando hacia abajo para hacer la mayor cantidad de transmisiones de MIMO multi-usuario (Kim *et al.*, 2013).

En junio de 2015, el 3GPP inició un trabajo en procura de especificar las operaciones FD-MIMO para LTE-Advanced Pro en el *release 13*. FD-MIMO tiene dos factores diferenciadores importantes en comparación con las tecnologías MIMO de las versiones anteriores de LTE.

- El número de puertos de antena en el eNb se incrementa de 8 a 16, por lo cual FD-MIMO mejora significativamente las capacidades de conformación de haces y multiplexación espaciales.
- El soporte para FD-MIMO está dirigido a antenas ubicadas en una matriz 2D planar, lo que es útil para reducir el factor de forma de las antenas en aplicaciones prácticas.

3.3 MIMO a Gran Escala

Como se presentó al inicio de este capítulo y tal como lo establecen (Yang y Hanzo, 2015), se tiene un segundo tipo de MIMO en el que se hace uso de un gran número

de antenas conocido como MIMO a Gran Escala y relacionado con la sigla (LS-MIMO, *Large Scale MIMO*) haciendo referencia al sistema en el cual un gran número de antenas están montadas en el transmisor y de igual manera un gran número de antenas están ubicadas en el receptor.

Por lo anterior también es denominado como MIMO Punto a Punto donde las comunicaciones inalámbricas de datos se realizan mediante la conexión de dos puntos en este caso caracterizados por tener un número comparable de antenas tanto en recepción como en transmisión como se puede observar en la figura 3.8 (Yang y Hanzo, 2015).

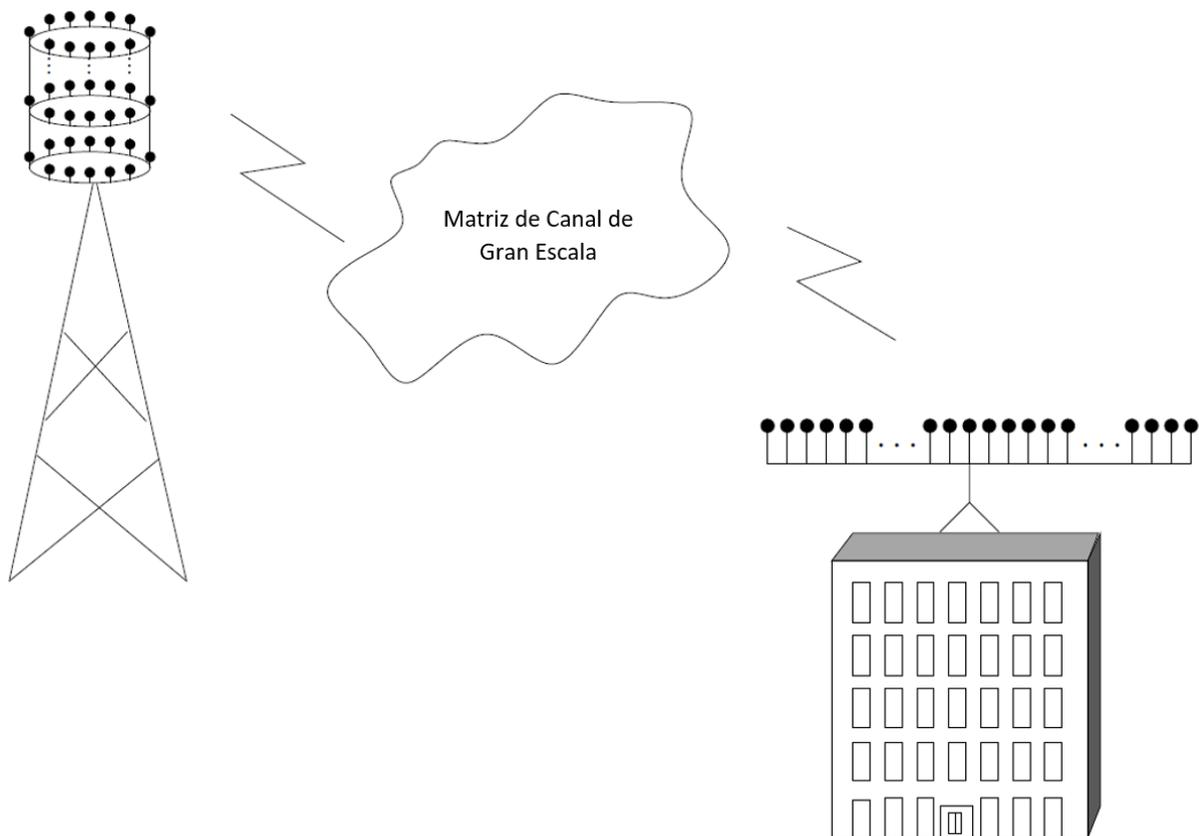


Figura 3.8. Ejemplo de MIMO a Gran Escala

La configuración de antena de este sistema puede ser caracterizada matemáticamente por 3.2 (Yang y Hanzo, 2015)

$$\lim_{N_t, N_r \rightarrow \infty} \frac{N_t}{N_r} = c \quad (3.2)$$

La distribución empírica de los valores singulares de la matriz de canal aleatorio \mathbf{H} converge a una distribución límite determinista para casi todas las realizaciones de \mathbf{H} , siendo esto el resultado de la ley de Marchenko y Pastur (Marčenko y Pastur, 1967), es decir, a medida que \mathbf{H} se hace más grande (en términos de N_t y N_r), sus valores singulares se vuelven menos sensibles a las distribuciones reales de las entrada i.i.d. \mathbf{H} y el canal se vuelve cada vez más determinista.

La ley de Marchenko y Pastur también muestra que a medida que aumenta el tamaño de \mathbf{H} , las entradas diagonales de $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$ se vuelven cada vez más grandes en magnitud que las entradas fuera de la diagonal. Esto es lo que se denomina endurecimiento del canal (*channel-hardening*), que puede explotarse para la detección MIMO a gran escala.

En términos más específicos: la inversión de matriz que se usa en muchos detectores MIMO tales como el detector de Forzado a Cero (ZF, *Zero Forcing*) o el detector de Mínimo Error Cuadrático Medio (MMSE, *Minimum Mean Square Error*) pueden aproximarse convenientemente usando la técnica de expansión en serie para matrices aleatorias de gran dimensión (Moshavi *et al.*, 1996).

Además, el fenómeno de endurecimiento de canales puede permitir algoritmos de detección de baja complejidad para lograr un buen rendimiento para sistemas MIMO a gran escala (Chockalingam y Rajan, 2014).

Un caso de aplicación práctica de este segundo tipo de sistemas MIMO con un gran número de antenas, es la capacidad denominada *Self-Backhauling* que se propuso para el *release* 15, durante la plenaria del 3GPP RAN celebrada en Dubrovnik, Croacia en el presente año que se aprecia en la figura 3.9 (Ghadialy, 2017).

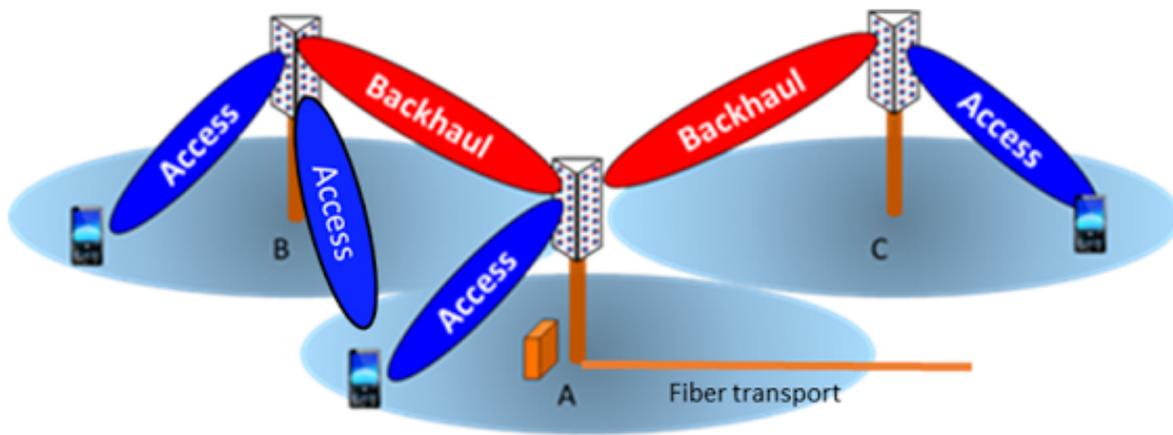


Figura 3.9. Aplicación de MIMO a Gran Escala

3.4 Beneficios y Retos

Los beneficios que a continuación se detallan, habilitan a la tecnología MIMO con gran número de antenas para ser parte de las redes de comunicación inalámbrica de 5G (Wang *et al.*, 2014). La investigación realizada en el área indica que el contar con una gran cantidad de antenas lo perfila evidentemente como solución a las necesidades de 5G al ofrecer beneficios tales como: mayor eficiencia espectral y aumento en la capacidad del sistema y en las velocidades de datos a los usuarios (Larsson *et al.*, 2014) (Huh *et al.*, 2012) (Marzetta y Ashikhmin, 2010); la existencia de una gran cantidad de antenas y el procesamiento que se hace con las mismas, conlleva a que el nivel de potencia requerido sea menor que el de los sistemas convencionales de tal forma que enmarca a esta tecnología en las que se han denominado comunicaciones verdes (*Green Communications*) (Lu *et al.*, 2014) (Björnson *et al.*, 2014b) (Ngo *et al.*, 2013); se tienen mejoras en la seguridad por la inherente mayor complejidad del nivel físico, el trabajo con haces estrechos dinámicos y canales ortogonales en contexto multi-usuario haciendo a la tecnología robusta por naturaleza frente a ataques como la escucha pasiva (Kapetanovic *et al.*, 2015) (Zhu *et al.*, 2014) (Dean y Goldsmith, 2017); el sistema goza de una mayor confiabilidad al disminuirse notoriamente los efectos del ruido no correlacionado y el desvanecimiento rápido (Larsson *et al.*, 2014) (Mehmood *et al.*, 2013a) (Rusek *et al.*, 2013); y el último beneficio importante para anotar es el logro de una mayor robustez en el sistema, pues, la gran cantidad de antenas disminuye el impacto que una falla en alguna de ellas pueda tener en el funcionamiento general del mismo (Larsson *et al.*, 2014) (Lu *et al.*, 2014). La Tabla 3.1 sintetiza estos beneficios.

De igual forma, tener tan gran cantidad de antenas en MIMO implica nuevos retos que abren posibilidades para la investigación y el desarrollo de la ingeniería, entre estos se encuentran: primero la contaminación de pilotos, pues, el movimiento del usuario impone un intervalo de coherencia finito durante el cual el conocimiento del canal debe ser adquirido y utilizado, y por consiguiente hay un número limitado de secuencias piloto ortogonales que se pueden asignar a los dispositivos. La reutilización de pilotos provoca una contaminación que crece con el número de antenas, además que estas secuencias ortogonales deben ser reutilizadas en celdas adyacentes (Hoydis *et al.*, 2013) (Jose *et al.*, 2011) (Marzetta, 2010), particularmente en este tema entre las soluciones propuestas para mejorar el desempeño de sistema se encuentra una estrategia basada asignar los pilotos con menor interferencia entre celdas a los

Tabla 3.1. Beneficios del uso de un Gran Número de Antenas en MIMO

Beneficios	Característica(s) Técnica(s)
Mayores velocidades de datos	Alta eficiencia espectral
Mayores capacidades en el sistema	MU-MIMO combinado con <i>Beamforming</i> permitirá atender altas densidades de usuarios
Comunicaciones verdes	Alta eficiencia energética
Mejoras en la seguridad	Canales ortogonales, haces estrechos, pseudo-ruido, complejidad de nivel físico
Mayor confiabilidad	Disminución de los efectos del ruido no correlacionado y el desvanecimiento rápido
Mayor robustez del sistema	Gran cantidad de antenas disminuyen el impacto del daño individual de alguna

usuarios con menor calidad de canal de una manera secuencial (Zhu *et al.*, 2015), otra estrategia propone conjuntos de pilotos idénticos para usuarios centrales y conjuntos mutuamente ortogonales para los usuarios de los bordes en celdas diferentes (Yan *et al.*, 2015), adicionalmente se ha logrado establecer la capacidad de usuarios del sistema en regímenes que sufren de esta contaminación inherente a la naturaleza de la tecnología (Shen *et al.*, 2015).

Como segundo reto está la mayor sensibilidad a la alineación de haces, esto porque al trabajar con haces tan estrechos, se aumenta el impacto del movimiento de los usuarios o el balanceo del grupo de antenas por diversas causas (Hoydis *et al.*, 2013) (Jose *et al.*, 2011).

Como tercero se tiene una mayor complejidad en el procesamiento de señal, específicamente cuando la celda puede necesitar atender un mayor número de dispositivos de usuario y la cantidad de antenas de recepción en la estación base se aproxima o llega a ser igual a la cantidad de antenas de los equipos de usuario, de tal forma que se requiere de algoritmos de detección rápidos, lo que implica baja complejidad, ante el nuevo contexto de operación con matrices masivas (Lu *et al.*, 2014) (Rusek *et al.*, 2013); de esta forma el proceso que se realiza en el receptor para detectar los símbolos que llevan la información por el medio inalámbrico se torna extremadamente complejo y al seguir los esquemas tradicionales de los sistemas MIMO de bajo orden

resultan en tiempos de ejecución muy elevados que hacen inviable su implementación práctica (Larsson *et al.*, 2014), pues, no atienden con efectividad la demanda de un procesamiento de señal rápido que permita aprovechar los beneficios aportados con la tecnologías conseguidos por el elevado número de antenas en capacidad, velocidad, disponibilidad y consumo energético.

Como cuarto reto, hay dos preocupaciones importantes: el gran número de coeficientes de canal a estimar y la cantidad de pilotos requeridos. La primera de ellas es una cuestión de complejidad y la segunda una cuestión de recursos radioeléctricos. Los pilotos diluyen la fracción de los recursos utilizados para los datos y, junto con la tasa de cambio del canal, constituye uno de los límites fundamentales (Björnson *et al.*, 2014a). Hay enfoques investigados para el caso de duplexación por división de frecuencia (FDD, *Frequency-division duplexing*), donde se necesita estimar canales tanto para el enlace descendente como el ascendente, pero normalmente se basan en propiedades muy específicas del canal.

En el quinto lugar se encuentra el tema del *Hardware* de bajo costo, pues, construir cientos de cadenas de RF, conversores ascendentes/descendentes, convertidores analógico a digital (A/D) y digital a analógico (D/A), requerirá de una economía a gran escala que permita cubrir estos gastos (Björnson *et al.*, 2013).

El último reto importante que se anota es la caracterización del canal, al ser importante obtener un modelo de canal analítico más sofisticado, donde no necesariamente se debe corregir cada fino detalle, pero si debe por lo menos capturar el comportamiento esencial del canal (Lu *et al.*, 2014). La Tabla 3.2 sintetiza estos retos.

Tabla 3.2. Retos del uso de un Gran Número de Antenas en MIMO

Retos	Problemáticas
Mayor complejidad en el procesamiento de señal	Desarrollo de Algoritmos de detección rápidos ante nuevas matrices masivas
Contaminación de pilotos	El número de secuencias piloto ortogonales está limitado y deben ser reutilizadas en celdas adyacentes
Mayor sensibilidad a la alineación de haces	Un haz tan estrecho es sensible al movimiento de los usuarios o al balanceo del grupo de antenas
Estimación del canal	El gran número de coeficientes de canal a estimar y la cantidad de pilotos requeridos
Hardware de bajo costo	Gran cantidad de conversores ascendentes/descendentes, convertidores analógico a digital (A/D) y digital a analógico (D/A)
Caracterización del canal	Desarrollo de modelos de canal analíticos más sofisticados.

Capítulo 4

Detección en L-MIMO

Con la presentación de L-MIMO realizada en el capítulo anterior, sus beneficios pero especialmente sus retos, el trabajo realizado en esta Tesis se enmarca en dar solución a la problemática de la mayor complejidad en el procesamiento de señal que se relaciona en la primera fila de la Tabla 3.1.

Para lo anterior, en este capítulo se explica la Detección en MIMO, se relacionan los detectores que se han planeado en la actualidad para el hacerle frente y se detalla el funcionamiento de los que aplican a L-MIMO y que se usarán como referente de comparación frente a los Esquemas de Detección que se propone en esta Tesis.

4.1 Detección en MIMO

La detección en MIMO generalmente se asocia al problema de detección de símbolos que se encuentra en los sistemas multiantena (Telatar, 1999) (Paulraj y Kailath, 1994) basados en Multiplexación Espacial (SM, *Spatial Multiplexing*), como el Sistema Vertical de Espacio-Tiempo de Bell Laboratories (VBLAST, *Vertical Bell-labs Layered Space-Time*) (Foschini, 1996). Sin embargo, en el marco del procesamiento de señal, la detección MIMO debe interpretarse con base en el modelo matemático genérico que se detalla a continuación a partir de lo explicado por (Yang y Hanzo, 2015).

En sentido genérico, el problema de detección MIMO se define para un sistema lineal de N_I entradas cuya función de transferencia se describe mediante una matriz que tiene columnas no-ortogonales y sus salidas N_O están contaminadas por ruido aditivo.

Las entradas múltiples se pueden denotar como un vector \mathbf{s} , que se extrae aleatoriamente del conjunto \mathbb{A}^{N_I} compuesto por N_I vectores de elementos, cuyos componentes provienen de un conjunto finito $\mathbb{A} = a_m | m = 1, \dots, M$ y la probabilidad "a priori"

de cada vector seleccionado de \mathbb{A}^{N_I} es idéntica. El conjunto \mathbb{A} se conoce generalmente como el alfabeto de la constelación, cuyos elementos pueden tener valores reales o complejos. Además, s_n con $n = 1, \dots, M^{N_I}$, representa las realizaciones de \mathbf{s} , por lo tanto, también contienen los elementos de \mathbb{A}^{N_I} .

Entonces, la relación entre las entradas y las salidas de este sistema lineal se puede caracterizar por la ecuación 4.1:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (4.1)$$

donde $\mathbf{y} \in \mathbb{F}^{N_O}$ es el vector de señal recibido, $\mathbf{H} \in \mathbb{F}^{N_O \times N_I}$ es la función de transferencia/matriz de canal del sistema y $\mathbf{n} \in \mathbb{F}^{N_O}$ representa el vector de ruido aditivo. \mathbb{F} puede ser real o compleja dependiendo de la aplicación específica.

A partir del modelo matemático genérico de la ecuación 4.1, la tarea de la Detección en MIMO es estimar el vector de entrada \mathbf{s} basándose en el conocimiento del vector de señal recibido \mathbf{y} y la matriz de canal \mathbf{H} .

Notación

El modelo anterior se lo representa generalmente como $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}$ y por eso para la simulación que se presenta en el capítulo 6 la aproximación de \mathbf{s} se representa como $\hat{\mathbf{s}}$ como se verá por ejemplo en el algoritmo 2 y como se usa en el código realizado con fines de simulación. En este sentido $\hat{\mathbf{s}}$ es el estimado de \mathbf{s} .

La notación de la ecuación 4.1 se usa en (Bai y Choi, 2012), en (Bai *et al.*, 2014) y en (Yang y Hanzo, 2015). Sin embargo la expresión puede encontrarse en otras formas tales como:

- $\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{w}$ (Tse y Viswanath, 2005)
- $\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}$ (Bottomley, 2012)
- $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{z}$ (Cho *et al.*, 2010a)

De esta manera en este documento aunque se prefiere el uso de \mathbf{s} y $\hat{\mathbf{s}}$, estos vectores puede encontrarse como \mathbf{x} y $\hat{\mathbf{x}}$ respectivamente, lo cual pasa en algunas figuras correspondiendo al uso original en la fuente citada.

De igual manera tanto para el Diseño del Esquema de Detección como para su implementación se hace uso de ambas formas, en casos donde se requiere.

4.1.1 Modelo de Canal MIMO

Los sistemas MIMO multiplexados espacialmente (SM, *Spatial Multiplexing*) tienen la ventaja que pueden transmitir datos a mayor velocidad. Sin embargo, la demultiplexión espacial o la detección de señales en el receptor es una tarea desafiante para estos sistemas SM MIMO.

La mayor dificultad que presentan los sistemas MIMO está en la parte de recepción, pues, el receptor debe ser capaz de captar las diferentes señales que llegan del medio con sus múltiples antenas y organizar la información de tal modo que no se pierda coherencia en el mensaje transmitido

El medio de transmisión juega un papel importante en el algoritmo de detección, ya que en éste se afectan las señales introduciendo variaciones en la misma que deben ser analizados y posteriormente eliminados por el receptor.

Para el caso particular de Comunicaciones Inalámbricas que se trata en esta Tesis, se considera el modelo de canal MIMO con desvanecimiento plano (*flat fading*) tipo Rayleigh con N_T antenas transmisoras x N_R antenas receptoras, representando una instancia del modelo matemático genérico de la ecuación 4.1

En este caso específico, se tiene $N_T = N_I$ y $N_R = N_O$ que representan el número de antenas transmisoras y receptoras, respectivamente como se aprecia en la figura 4.1 (Yang y Hanzo, 2015).

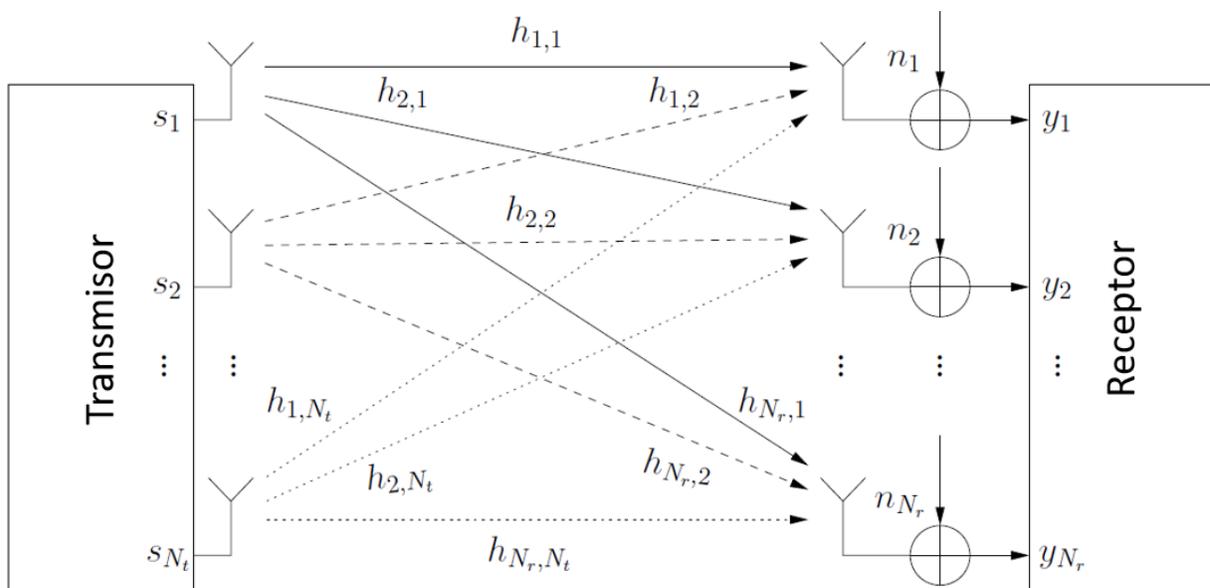


Figura 4.1. Modelo de Canal en Multiplexación Espacial MIMO

El vector de símbolos transmitidos es $s = [s_1, \dots, s_{(N_T)}]^T$ y el vector de símbolos recibidos es $y = [y_1, \dots, y_{(N_R)}]^T$. Se asume que los vectores de símbolos en \mathbf{s} son aleatorios no correlacionados con media cero y matriz de covarianza $\sigma_s^2 I$, donde I es la matriz identidad. Los vectores de Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*) $n = [n_1, \dots, n_{(N_R)}]^T$ son independientes e idénticamente distribuidos (i.i.d) con media cero y matriz de covarianza $\sigma_n^2 I$. La matriz del canal de valores complejos \mathbf{H} tiene entradas gaussianas i.i.d con media zero y varianza unitaria y se asume que es perfectamente conocida en el receptor.

Como las salidas del sistema en el intervalo de tiempo actual son independientes de las entradas del sistema en intervalos de tiempo previos, su modelo de tiempo discreto equivalente en banda base (es decir, muestreado), que representa una instancia del modelo genérico expresado en la ecuación 4.1, puede escribirse como 4.2 (Yang y Hanzo, 2015).

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{N_R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,N_T} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,N_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1} & h_{N_R,2} & \cdots & h_{N_R,N_T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_{N_T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_{N_R} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

En esta expresión $h_{j,i}$ indica la respuesta de impulso entre la i -ésima antena de transmisión y la j -ésima antena de recepción, con $i = 1, 2, \dots, N_T$ y $j = 1, 2, \dots, N_R$.

4.1.2 Clasificación de los Detectores

Los esquemas de detección (detectores) pueden dividirse en óptimos donde se encuentran el de Máxima Verosimilitud (ML, *Maximum Likelihood*) y el de Máximo "a Posteriori" (MAP, *Maximum a Posteriori*) y sub-óptimos donde se encuentran los demás, que a su vez pueden categorizarse como lineales y no-lineales como se muestra en la figura 4.2 (Yang y Hanzo, 2015):

Una particularidad inherente a los sistemas L-MIMO es su gran dimensión, antes de investigar la aplicabilidad de los algoritmos de detección MIMO existentes en este contexto, se debe identificar qué tipo específico de sistemas L-MIMO se considera. Por un lado, en general, la mayoría de los detectores MIMO existentes serían aplicables a un sistema tipo MIMO Masivo, donde es posible se establece que los detectores MIMO lineales de baja complejidad como ZF y MMSE puedan ofrecer el rendimiento que se requiere.

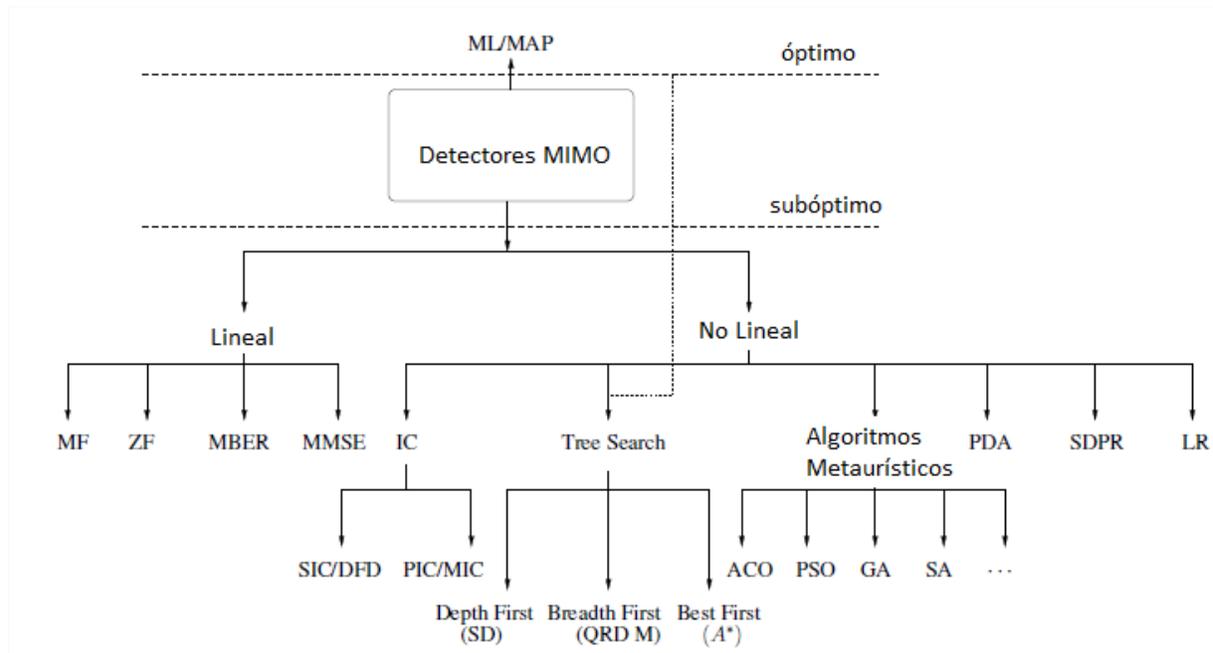


Figura 4.2. Clasificación de los Algoritmos de Detección en MIMO

Por otro lado, algunos algoritmos de detección MIMO existentes que se han diseñado específicamente para los sistemas MIMO convencionales de pequeña y mediana escala pueden no ser aplicables a los sistemas L-MIMO, porque su complejidad aumentaría de forma exponencial de tal forma que sería inviable su implementación práctica.

Por ejemplo, la familia de detectores MIMO basados en la búsqueda de árboles, como el popular Detector Esférico (SD, *Sphere Detector*) y los de Reducción de Enrejado (LR, *Lattice Reduction*) entre otros, elevan significativamente su complejidad cuando el número de antenas comienza a ser grande, de tal forma que en el peor de los casos, aumenta exponencialmente con el número de antenas de transmisión.

A los algoritmos actuales que se han utilizado en MIMO les surgen problemas de complejidad o desempeño cuando deben tratar con un gran número de antenas, pudiéndose aportar con la aplicación técnicas basadas en otros algoritmos, metaheurísticas o combinación de ella, algunas sub-óptimas pero de baja complejidad para hacer viable la implementación real de sistemas L-MIMO y en especial el aprovechamiento de sus beneficios (Lu *et al.*, 2014).

4.2 Detectores que se Plantean en la Actualidad

En general como se detalla a continuación, algoritmos que han funcionado muy bien en MIMO llegando a estar próximos a ML, elevan significativamente su complejidad cuando el número de antenas comienza a ser grande por lo que se han debido emplear otros enfoques algunos de los cuales están basados en metaheurísticas o inteligencia computacional, para procurar por baja complejidad. A continuación se relacionan algunos de los trabajos que se han realizado con este propósito.

(Švač *et al.*, 2013) proponen un detector de baja complejidad para sistemas L-MIMO con constelaciones BPSK o QAM. El detector trabaja a nivel de bits y constan de tres etapas; se hace uso de algoritmos de tipo "*soft-heuristic*" y se soportan mejoras de desempeño sobre algoritmos de detección actuales para sistemas L-MIMO.

(Datta *et al.*, 2013) proponen algoritmos de baja complejidad basados en Cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC, *Monte Carlo Markov Chain*) para detección de señal y estimación de canal en el *uplink* en L-MIMO multiusuario con una gran cantidad de antenas en la BS y así mismo un gran número de usuarios.

(Zhou y Ma, 2013) detallan el gran potencial de los sistemas L-MIMO para la próxima generación de comunicaciones inalámbricas; proponen algoritmos de reducción de enrejado basada en elementos (ELR, *Element-Based Lattice Reduction*) que minimizan los elementos de la diagonal de la matriz de covarianza de ruido de detectores lineales, mejorando el rendimiento asintótico. Los algoritmos propuestos encuentran soluciones sub-óptimas a las reducciones, con baja complejidad y alto rendimiento frente a otros detectores de baja complejidad para sistemas L-MIMO.

(Suthisopapan *et al.*, 2012) presentan el resultado de la aplicación de los códigos de comprobación de paridad de baja densidad no binarios (NBLDPC, *Non Binary Low Density Parity Check*) a sistemas L-MIMO. Se muestra que al incorporar el detector de mínimo error cuadrático medio (MMSE, *Minimum Mean Squared Error*) de baja complejidad y códigos NBLDPC, este tipo de sistemas L-MIMO pueden conseguir una baja probabilidad de error de bit cerca del límite de la capacidad de MIMO ofreciendo un mejor desempeño frente a otros sistemas con los que hacen la comparación.

(Ćirkić y Larsson, 2012) proponen un método denominado marginación sub-espacial con supresión de interferencias (SUMIS, *Subspace Marginalization with Interference Suppression*), que ofrece un rendimiento notable a baja complejidad (determinista), se indica un adecuado balance entre complejidad y rendimiento computacional, trabajando con un proceso inicial de organización que hace una selección de columnas de

la matriz de canal; este algoritmo no implica ninguna búsqueda ni ramificación algorítmica, por lo que tiene un tiempo de ejecución predecible.

(Svac *et al.*, 2012) proponen un detector de baja complejidad para L-MIMO aplicado a BPSK y QAM, funciona en el nivel de bits y exhibe ventajas para sistemas L-MIMO, se compone de tres etapas, la primera realiza la detección parcial de máxima verosimilitud (ML, *Maximum Likelihood*), la segunda hace la generación de valores flexibles y la tercera realiza un proceso de optimización genética; en la última etapa el algoritmo de programación genética utiliza los valores suaves calculados por la segunda etapa, los resultados de simulación demuestran que para L-MIMO, el detector entrega mejores resultados que el de los detectores de referencia frente a los que se compara.

(Zhou y Ma, 2012) exponen la técnica de reducción de enrejado (LR, *Lattice Reduction*) dada su relativa baja complejidad y alto desempeño, porque indican que cuando el número de antenas es muy grande este tipo de detectores exhiben un resultado que se mantiene distante frente del detector óptimo de ML por lo que frente a esta situación desarrollaron los detectores LR de tipo K-best, aunque conllevando un aumento en la complejidad computacional; por lo que proponen un algoritmo LR de tipo K-best con menor complejidad haciendo uso de una cola de prioridades, lo que lo hace conveniente para sistemas L-MIMO.

(Kumar *et al.*, 2011) proponen el algoritmo MCMC Aleatorias (R-MCMC, *Randomize-Monte Carlo Markov Chain*) como una variante del algoritmo de Cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC) y además se propone un algoritmo con un enfoque en selección al azar para escoger los vectores candidatos a ensayar en una búsqueda local, además presentan cómo la complejidad que ofrecen los algoritmos MCMC y R-MCMC es atractiva para sistemas L-MIMO.

Finalmente algunos trabajos se han orientado a la aplicación de metaheurísticas, es así como:

(Datta *et al.*, 2011) exhiben el aporte que para detección en sistemas L-MIMO ha tenido el algoritmo de búsqueda local denominado Búsqueda Tabú Reactiva (RTS, *Reactive Tabu Search*) y el algoritmo de Propagación de Creencias (BP, *Belief Propagation*), de la observación del comportamiento de los dos algoritmos mencionados se propone un esquema de algoritmo híbrido que aprovecha lo mejor de ambos y los resultados presentados evidencian mejoras al usarlos combinados.

(Li y Murch, 2010) presentan un algoritmo de baja complejidad para detección sistemas L-MIMO basados en el algoritmo de Búsqueda Ascendente de Verosimilitud (LAS,

Likelihood Ascent Search), con éste se generan diversas salidas y se trata de seleccionar la mejor; las simulaciones demuestran que el algoritmo propuesto: mantiene el mismo orden de complejidad del algoritmo LAS convencional, pero es superior en Tasa de Error.

(Chockalingam, 2010) presentan y comparan en cuanto a BER, tres algoritmos de baja complejidad aplicables a sistemas L-MIMO, estos algoritmos incluyen la Búsqueda Ascendente de Verosimilitud (LAS) y la Búsqueda Tabú Reactiva (RTS), y uno de paso de mensajes basado en Propagación de Creencias (BP, Belief Propagation) perfilándolas como técnicas eficientes de baja complejidad a considerar para el diseño de sistemas L-MIMO de alta eficiencia espectral.

(Céspedes *et al.*, 2014) presentan los resultados del uso la técnica de Propagación de Esperanzas (EP, *Expectation Propagation*) en sistemas MIMO de alta dimensión (con gran número de antenas) donde se aprecia su alta efectividad, exhibiendo gran desempeño.

4.3 Detectores de Referencia

Por lo expuesto en las secciones anteriores de este capítulo, los detectores que se toman como referencia para efectos de hacer comparaciones con los Esquemas de Detección que se proponen en esta Tesis son los detectores lineales ZF y MMSE y sus versiones de Cancelación Sucesiva de Interferencias (SIC, *Successive Interference Cancellation*).

De forma general la detección lineal se basa en la relación entrada - salida del sistema MIMO como se ilustra en la figura 4.3 (Tse y Viswanath, 2005). En el lado receptor la estimación del vector transmitido \mathbf{s} se toma mediante una transformación lineal del vector recibido \mathbf{y} (Bashir *et al.*, 2007). La señal recibida es expuesta a un filtro lineal para suprimir la interferencia y cada símbolo de datos se detecta individualmente (Cho *et al.*, 2010b) (Tse y Viswanath, 2005) (Goldsmith, 2005). La detección lineal matemáticamente está representada por la ecuación 4.3 (Cho *et al.*, 2010b).

$$\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{W}\mathbf{y} \quad (4.3)$$

Donde \mathbf{W} es una matrix de estimación combinada con un cuantificador Q , el cual se encarga de mapear los símbolos al punto de constelación más próximo (Bai y Choi, 2012) (Ćirkić, 2014).

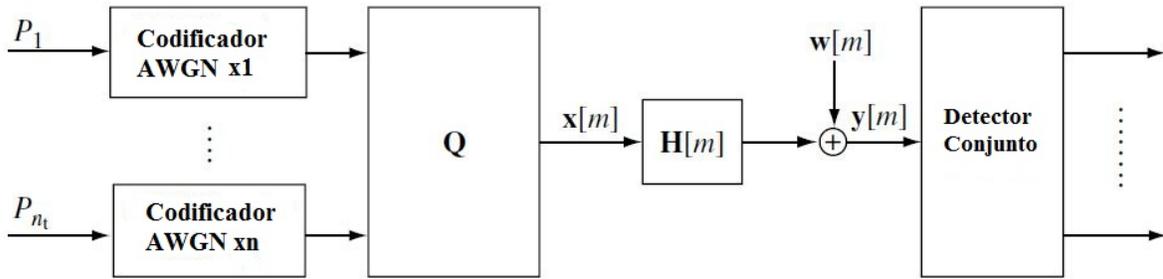


Figura 4.3. Arquitectura de Detección Lineal MIMO

En general, la detección lineal es reconocida por su baja complejidad lo que la hace aparecer en el escenario L-MIMO, pero tienen un desempeño considerablemente menor en comparación con el detector de ML por lo cual se recurre a mejoras como las versiones SIC.

4.3.1 Detector ZF

El detector de Forzado a Cero (ZF, *Zero Forcing*) parte del conocimiento de la matriz del canal \mathbf{H} para eliminar la interferencia que las otras señales transmitidas causan sobre la señal recibida, luego compara los símbolos de la señal recibida con los de la constelación, cabe resaltar que ZF no elimina los componentes de ruido que afectan a la señal (Bai *et al.*, 2014) (Cho *et al.*, 2010a).

La detección ZF multiplica el vector de símbolos recibidos y por una matriz de ecualización \mathbf{W} , en la forma $\hat{\mathbf{s}}_{\text{ZF}} = (\mathbf{W}_{\text{ZF}})\mathbf{y}$

La ecualización ZF se deriva de la pseudo-inversa de Moore-Penrouse de \mathbf{H} (Čirkić, 2014) (Golub y Van Loan, 1996),

$$\mathbf{W}_{\text{ZF}} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H = \mathbf{H}^+ \quad (4.4)$$

Donde $(-)^{-1}$ y $(-)^H$ corresponden a la matriz inversa y a la hermitiana respectivamente.

Por tanto el vector estimado de símbolos $\hat{\mathbf{s}}_{\text{ZF}}$ por un detector ZF es:

$$\hat{\mathbf{s}}_{\text{ZF}} = \mathbf{H}^+ \mathbf{y} = \mathbf{s} + \hat{\mathbf{n}}_{\text{ZF}} \quad (4.5)$$

De la expresión 4.5 se remueve la perturbación de s generada por el canal \mathbf{H} en el vector \mathbf{y} que se recibe, como si se invirtiera el efecto del canal. De esta manera, el receptor intenta forzar la correlación cruzada entre el error de estimación y el vector s a cero, de allí el nombre de este detector (Čirkić, 2014).

4.3.2 Detector MMSE

El detector de Mínimo Error Cuadrático Medio (MMSE, *Minimum Mean Square Error*) emplea un filtro lineal que considera el efecto del ruido y lo minimiza conjuntamente con la interferencia, originando la disminución del error cuadrático medio entre los símbolos transmitidos y los recibidos (Čirkić, 2014) (Cho *et al.*, 2010a) (Bashir *et al.*, 2007) (Kay, 1993).

Así la estrategia que el detector MMSE utiliza, es minimizar el error cuadrático medio entre los datos reales transmitidos y los datos de salida del canal $E[||s - \mathbf{W}^H \mathbf{y}||^2]$ después de usar la matriz de transformación lineal.

Esta matriz de transformación \mathbf{W}_{MMSE} se obtiene de resolver la ecuación 4.6.

$$\mathbf{W}_{\text{MMSE}} = \underset{\mathbf{W}}{\operatorname{argmin}} E[||s - \mathbf{W} \mathbf{y}||^2] \quad (4.6)$$

Y se presenta en la ecuación 4.7 (Čirkić, 2014) (Cho *et al.*, 2010a):

$$\mathbf{W}_{\text{MMSE}} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2} \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}^H = \mathbf{H}^- \quad (4.7)$$

Por tanto el vector estimado de símbolos \hat{s}_{MMSE} por un detector MMSE es:

$$\hat{s}_{\text{MMSE}} = \mathbf{W}_{\text{MMSE}} \mathbf{y} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2} \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{y} \quad (4.8)$$

Lo cual puede expresarse también como se hizo para el caso de ZF como:

$$\hat{s}_{\text{MMSE}} = \mathbf{H}^- \mathbf{y} = \tilde{s} + \hat{\mathbf{n}}_{\text{MMSE}} \quad (4.9)$$

Comparado con el detector lineal ZF, el detector lineal MMSE logra un mejor equilibrio entre la eliminación de la Interferencia Multiusuario (MUI, *Multiuser Interference*) y el realce del ruido al minimizar conjuntamente el error total impuesto tanto por la MUI como por el ruido.

Por lo tanto, el detector lineal MMSE logra un mejor rendimiento frente al detector ZF. Este factor es clave para el Diseño del Esquema de Detección propuesto en esta Tesis como se verá más adelante en el capítulo 6.

4.3.3 Versiones SIC

Los métodos de detección lineales presentan una baja complejidad en cuanto a su implementación en hardware, sin embargo, sufren de un pobre desempeño. Por lo cual sus resultados se pueden mejorar con un aumento relativamente leve en la complejidad mediante la Cancelación Sucesiva de Interferencias (SIC, *Successive Interference Cancellation*).

En esta forma se tiene un banco de receptores lineales, donde cada uno detecta uno a uno de los flujos de datos paralelos, cancelando sucesivamente las componentes de señal detectadas a partir de la señal recibida en cada etapa.

Los receptores en SIC identifican qué antena de transmisión tuvo el mejor canal y tratan de detectar el símbolo enviado por esa antena. Una vez detectado, ese símbolo se resta de la información recibida en otras antenas. Cuando se aplica SIC, el orden de la detección es muy importante para el desempeño del sistema de detección. Existen varios métodos para determinar el orden de detección (Cho *et al.*, 2010a), uno muy aceptado utiliza la matriz de covarianza del error de estimación, pues, los procesos de anulación y cancelación pueden provocar propagación de errores: si s_1 se estima inadecuadamente puede producir errores importantes en la estimación de los aún desconocidos s_2, s_3, \dots

Para reducir los efectos de esta posible propagación, se trabaja como se propuso en VBLAST (Wolniansky *et al.*, 1998), yendo desde la señal más "fuerte" a la más "débil".

La técnica ZF-SIC básicamente consta de los siguientes tres pasos recursivos:

- Ordenamiento: se determina el flujo transmitido con la menor varianza de error para establecer un orden.
- Anulación de Interferencia: se estima la señal transmitida más fuerte anulando todas las señales débiles.
- Cancelación de Interferencia: se extraen los bits de datos, se resta su contribución del vector de señal recibido y se retorna a la etapa de ordenamiento.

Para el caso de MMSE-SIC (Liu y Liu, 2008) se decide sobre la componente con la diagonal más pequeña en la matriz de covarianza en la ecuación 4.9 y se remueve su efecto en el canal de salida y luego de cada iteración se actualiza el vector recibido.

El algoritmo de MMSE-SIC consta de tres pasos en forma similar a ZF:

- Calcular la matriz \mathbf{W} buscando la entrada de diagonal j -ésima más pequeña. Permutar la columna j -ésima de \mathbf{H} para que sea última columna y permutar las filas de \mathbf{W} en consecuencia.
- A partir de la estimación determinar los elementos detectados \hat{s} .
- Si aún quedan flujos de estimación por procesar se regresa al primer paso.

La aplicación de SIC de manera repetida entrega una estimación sub-óptima del vector transmitido como se muestra en la figura 4.4 (Cho *et al.*, 2010a).

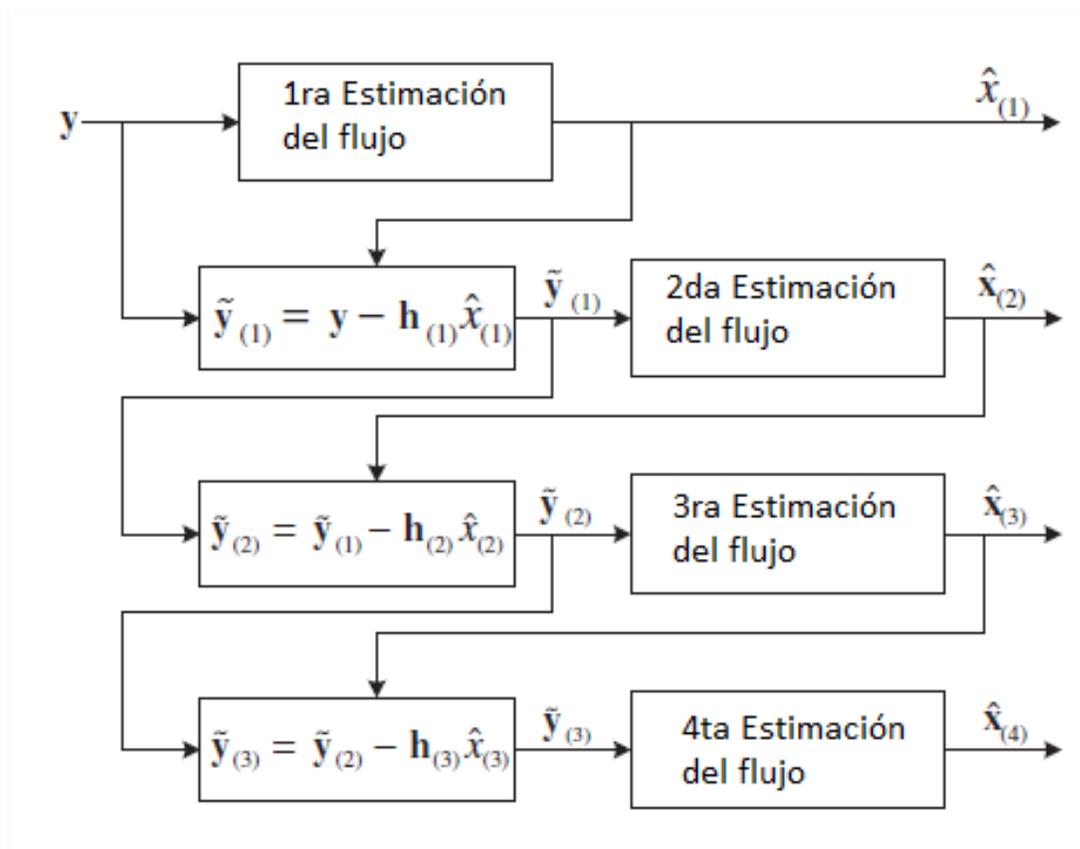


Figura 4.4. Detección de 4 Flujos Espaciales utilizando SIC

Capítulo 5

Esquema de Detección Propuesto

En este capítulo se presenta el Diseño del Esquema de Detección que se propone en esta Tesis. Para el cual lo que se hizo fue considerar el uso de una Metaheurística que hubiera tenido éxito histórico en encontrar mínimo globales y en segundo lugar que el trabajo de (Datta *et al.*, 2011) había mostrado que la Búsqueda Tabú Reactiva (RTS, *Reactive Tabu Search*) ofrecía buenos resultados en detección, generaron una inquietud sobre la versión original: ¿Cuál sería el desempeño de la Búsqueda Tabú? Metaheurística con gran cantidad de aplicaciones que sigue manteniendo vigencia. Así surge entonces la motivación para trabajar con ella, entenderla, abstraerla, aplicarla a la detección en MIMO y ver sus resultados.

5.1 Búsqueda Tabú

Para poder aportar al proceso de Detección de Símbolos en Large MIMO se pensó en recurrir al enfoque del uso de metaheurísticas con el ánimo de lograr resoluciones sub-óptimas pero en tiempos de realización práctica. Al relacionar a la Búsqueda Tabú (TS, *Tabu Search*) con otras metaheurísticas, se encuentra que existen algunos ideales similares en sus procesos de soluciones como también varían en algunos parámetros como su trayectoria, su función objetiva dinámica, su presencia o no de memoria, entre otros, lo cual se aprecia en la Figura 5.1 (Dreo, 2007).

En la revisión del estado del arte que se hizo sobre los detectores para L-MIMO y que aparece en la sección 4.2, se encontró los basados en metaheurísticas orientadas a la búsqueda tales como LAS y RTS y llamó la atención que no se había trabajado la metaheurística de la Búsqueda Tabú (TS, *Tabu Search*) en su forma original, por lo cual se decidió explorar el diseño e implementación con ella y ver los resultados que se obtenían al hacer su aplicación a la detección en L-MIMO.

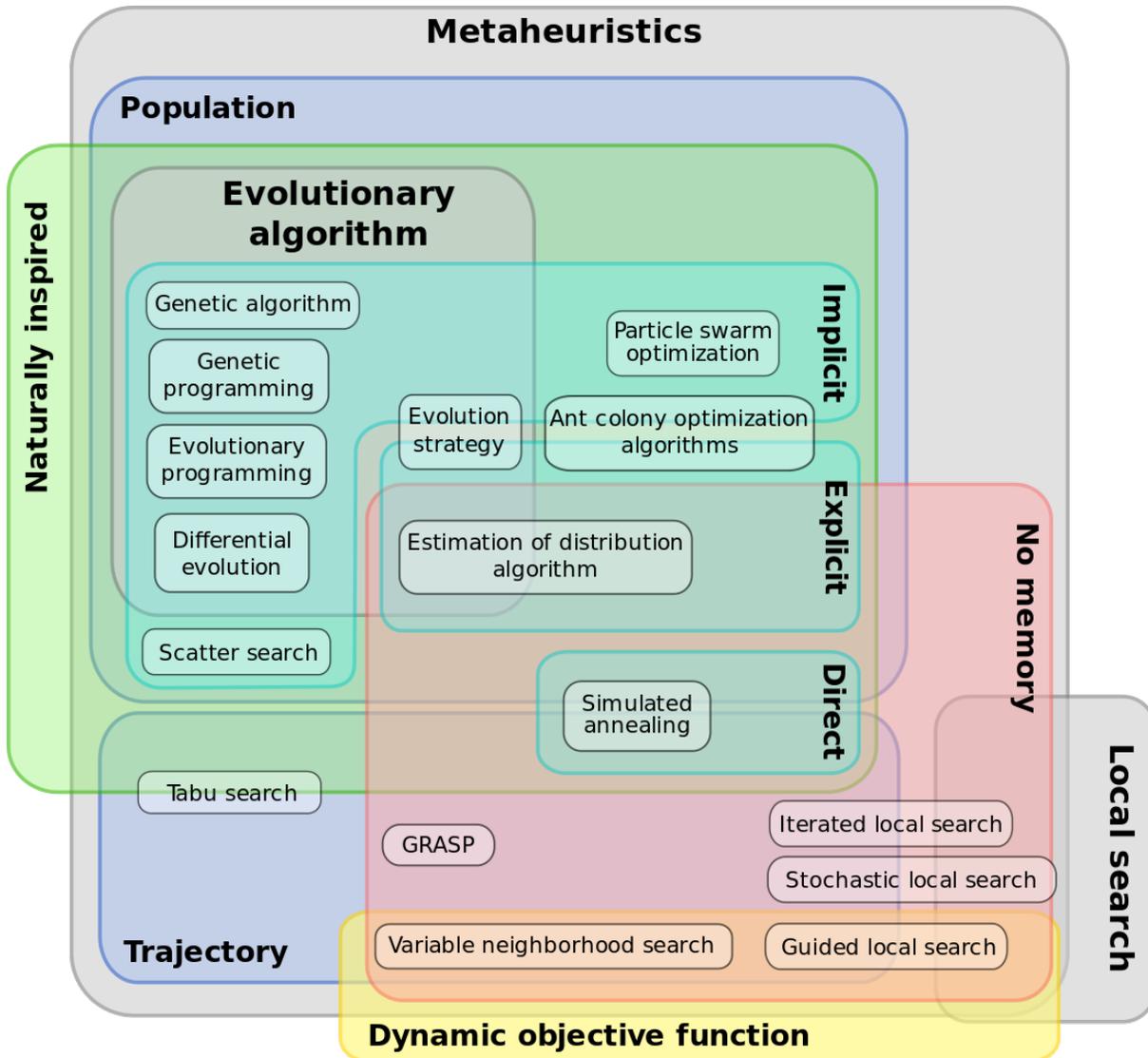


Figura 5.1. Clasificación de Metaheurísticas

A continuación aparece la descripción de la metaheurística lo cual es la base para poder abstraerla y proceder a llevarla al uso en el campo de la Detección de Símbolos en L-MIMO.

En general esta metaheurística nace de la necesidad de trabajar con grandes cantidades de datos, que llevaron a generar un método que ha permitido solucionar problemas y donde su filosofía permite explotar diversas estrategias existentes para la solución de dichos problemas. Así, surge la Búsqueda Tabú (TS, *Tabu Search*) la cual ha demostrado históricamente el éxito de su aplicación en diversos campos de la ciencia y la tecnología.

Actualmente TS tiene diversas aplicaciones que abarcan dominios tales como: la bioinformática, clasificación de patrones, de distribución de energía, ingeniería molecular, diseño VLSI, planificación de recursos, telecomunicaciones, análisis financiero, programación, planificación espacial, logística, fabricación flexible, gestión de residuos, exploración mineral, análisis biomédico, conservación, entre otros.

TS se ha convertido en uno de los métodos de elección para diseñar procedimientos de solución a problemas de optimización combinatoria difíciles. El éxito obtenido con la aplicación de TS en aplicaciones de optimización ha elevado su popularidad y hace que esta metaheurística se mantenga vigente encontrándose aplicación en las nuevas tecnologías y áreas de exploración del ser humano. TS también es utilizada para crear híbridos, al momento de unir esta metaheurística con otros algoritmos o técnicas del campo específico de aplicación. En la tabla 5.1 se presenta un extracto de la diversidad de aplicaciones de TS en diferentes áreas de trabajo (Du y Pardalos, 2013) (Glover y Laguna, 2007a).

5.1.1 Historia de la Búsqueda Tabú

El término TS fue introducido en 1986 por Fred Glover en el mismo artículo que introdujo el término metaheurística. Los principios fundamentales de la búsqueda fueron elaborados en una serie de artículos a finales de los años 80 y principios de los 90, que fueron luego unificados en el libro "Tabu Search" en 1997 (Melian y Fred, 2003).

De ahí que las técnicas metaheurística sean procesos de búsqueda que tampoco garantizan la solución óptima del problema considerado y que basan la aplicación de reglas relativamente sencillas. La diferencia de los heurísticos con las técnicas metaheurísticas está en que las últimas tratan de huir de resultados óptimos para orientar su exploración en cada momento dependiendo de la evolución del proceso de búsqueda. La lógica de las técnicas metaheurísticas es similar debido a que:

"El punto de partida es una solución (o conjunto de soluciones) que típicamente no es óptima. A partir de ella se obtienen otras parecidas, de entre las cuales se elige una que satisface algún criterio, a partir de la cual comienza de nuevo el proceso. Este proceso se detiene cuando se cumple alguna condición establecida previamente." (Alvaro, 2007)

Usualmente el término tabú era usado por los aborígenes de la isla Tonga (Polinesia) y era empleado para referirse a cosas sagradas y que no podían tocarse. Actualmente se define como "Una prohibición impuesta por costumbres sociales como una

APLICACIONES DE TS	
Programación Fabricación de celdas de tiempo de flujo Programación heterogénea del procesador Programación de despacho de flujo Listar Programación de máquinas Programación de despacho de tarea Secuencia y procesamiento de datos	Telecomunicaciones Enrutamiento de llamadas Empaquetado del ancho de banda Ubicación de la instalación del controlador Asignación de ruta Diseño de red para servicios Fallas en la arquitectura de red Redes ópticas sincrónicas
Diseño Diseño asistido por computador Diseño de redes de transporte Planificación del espacio de la arquitectura Diseño de redes de carga fija Redes tolerantes a fallas Diseño de planeación de salida	Producción, Inventario e Inversión Gestión de la cadena de suministro Producción justo a tiempo Selección de piezas Planificación de inventario de varios artículos Descuento de adquisición por cantidad Optimización de cartera de proyectos
Lógica e Inteligencia Artificial Máxima satisfacción Lógica probabilística Reconocimiento y clasificación de patrones Minería de datos Diseño de red neuronal Entrenamiento de redes neuronales	Enrutamiento Enrutamiento de vehículos Enrutamiento capacitado Enrutamiento de ventana de tiempo Enrutamiento multimodo Vendedor viajero Comprador viajero
Tecnología Construcción de la estación espacial Distribución de energía eléctrica Ingeniería de diseño estructural Colocación celular de circuito Exploración de petróleo fuera de la costa	Optimización Combinacional General Programación Zero-One Optimización de carga fija Programación no lineal y no convexa Optimización discreta multiobjetivo Optimización global entera mixta

Tabla 5.1. Aplicaciones de la Búsqueda Tabú

medida de protección", aunque también como una marca que representa riesgo, de esta manera es interpretado en este método donde se evita el riesgo de un camino no

productivo que en este contexto se denomina un óptimo local.

Según Fred Glover, "TS guía un procedimiento de búsqueda local para explorar el espacio de soluciones más allá del óptimo local", es una búsqueda que utiliza una operación para definir la vecindad de cualquier solución dada.

5.1.2 Funcionamiento de la Búsqueda Tabú

TS tiene como propósito principal suministrar "inteligencia" en los procesos de búsqueda local, el cual consiste en hacer una suposición de que una mala elección estratégica puede ser una mayor fuente de información que una buena elección al azar, dado que una mala elección estratégica puede ayudar a orientar la búsqueda hacia mejores posibles soluciones, descartando las soluciones parecidas a esta.

Para evitar que la búsqueda quede encapsulada en un solo conjunto de soluciones se tiene en cuenta un parámetro y se acumula información en una memoria adaptativa, la cual tiene como función identificar las soluciones analizadas con anterioridad y así obtener un listado de los elementos a tener en consideración durante la búsqueda. Además, cuando una nueva solución es generada, se inserta dentro del listado y permanece allí hasta que sea remplazada por una nueva solución (Glover y Laguna, 2013).

TS orienta la búsqueda según su historia, es decir, el procedimiento trata de extraer información de lo sucedido y actuar a partir de los resultados obtenidos. Esta idea se toma del concepto de memoria aplicado en los procedimientos de inteligencia artificial ya que al realizar la búsqueda se presenta cierto aprendizaje, convirtiéndose en una búsqueda inteligente para permitirse mover a una solución aunque no sea tan buena como la actual, de modo que se pueda escapar de óptimos locales y continuar estratégicamente la búsqueda de soluciones aún mejores. De esta manera, TS contribuye en la resolución de problemas incorporando dos elementos claves: memoria adaptativa y exploración sensible. La función de memoria adaptativa permite la implementación de procedimientos capaces de buscar el espacio de la solución efectivamente. Dado que las elecciones locales se guían por la información recogida durante la búsqueda, TS contrasta con diseños sin memoria que dependen en gran medida de procesos semi-aleatorios que implementan una forma de muestreo. Así, la exploración sensible confirma que una mala elección estratégica a menudo puede aportar más información que una buena elección aleatoria (Glover y Laguna, 1997b).

TS puede aplicarse a prácticamente cualquier tipo de problema de optimización,

donde "optimizar" significa minimizar o maximizar una función $f(x)$ tal que $x \in X$. La función $f(x)$ puede ser lineal, no lineal o incluso estocástica y el conjunto X resume las restricciones sobre el vector de las variables de decisión x . Las restricciones también pueden incluir desigualdades lineales, no lineales o estocásticas, y pueden obligar a todos o algunos componentes de x a recibir valores discretos. Si bien esta representación es útil para discutir una serie de consideraciones de resolución de problemas, en muchas aplicaciones de optimización combinatoria, el problema de interés puede no ser fácilmente formulado como una función objetivo sujeta a un conjunto de restricciones. El requisito $x \in X$, por ejemplo, puede especificar condiciones lógicas o interconexiones que serían difícil para formular matemáticamente, pero puede ser codificadas como reglas después (Melian y Fred, 2003).

TS comienza procediendo iterativamente desde un punto (solución) a otro hasta que se satisface un criterio de terminación elegido. Cada solución x tiene un vecindario asociado $N(x)$ que se encuentra dentro de X , y cada solución $x' \in N(x)$ es alcanzada desde x por una operación.

Se puede contrastar TS con un método simple en el que el objetivo es minimizar $f(x)$. Tal método sólo permite movimientos a soluciones vecinas que mejoran el valor de la función objetivo actual y termina cuando no se pueden encontrar soluciones de mejora.

En los últimos años, se han publicado en revistas y documentos muchos casos de éxito de diferentes estudios o implementaciones de la TS ampliando la frontera de los problemas que pueden ser manejados con eficiencia y produciendo soluciones de óptima calidad (Melian y Fred, 2003) (Glover y Laguna, 2007b).

5.1.3 Conceptos de la Búsqueda Tabú

Para hablar de TS se hace necesario conocer el significado de diversos conceptos los cuales son claves en la intención de conocerla y poderla abstraer (Cirila, 2005).

Cuando se habla de TS, se puede analizar que este tipo de búsqueda puede ser aplicada de manera directa a expresiones verbales o simbólicas, reduciendo en muchos casos la complejidad de las interconexiones. En cuanto a las soluciones, una solución se encuentra dentro de un conjunto élite (donde pertenecen los óptimos locales) dependiendo de un puntaje el cual es obtenido a partir de la relación con la función objetivo.

Particularmente en TS, se hace uso de una memoria la cual está constituida por

unos mecanismos para la selección de los movimientos y una lista Tabú.

La **Lista Tabú** es una lista de soluciones previamente visitadas en un pasado cercano (memoria a corto plazo) la cual contiene por lo general las soluciones visitadas recientemente, los movimientos realizados recientemente o los atributos de dichas soluciones. Esta lista tiene un **Tamaño (*tenure*)** el cual describe el número de iteraciones para prohibir que un elemento sea eliminado (una vez añadido o abandonado), el *tenure* puede variar para diferentes tipos o combinaciones de atributos, y también puede variar en diferentes intervalos de tiempo o etapas de la búsqueda, esta variabilidad hace posible crear diferentes tipos de compensaciones entre las estrategias a corto y largo plazo, también proporciona una forma dinámica y robusta de búsqueda.

La elección de los tipos apropiados de listas de tabú depende del contexto, por otro lado el espacio de memoria necesario depende de los atributos y el tamaño del vecindario pero no depende del *tenure*.

Las soluciones tabú pueden dejar de ser soluciones al estar basadas en una memoria cambiante, debe haber una forma de "olvido estratégico", es decir, una solución o atributo pueda salir de la lista tabú antes de que se cumpla su plazo. Esto se implementa a través del **Criterio de Aspiración** que es una posibilidad que tiene una solución de ser aceptada aunque esté clasificada como tabú. Este concepto se basa en un olvido estratégico, de tal manera que similar como en las costumbres sociales las soluciones tabú pueden cambiar y dejar de serlo, es decir, que una solución o atributo pueda salir de la lista tabú antes de que se cumpla su plazo. Las aspiraciones son de dos clases:

- Aspiraciones de movimiento.
- Aspiraciones de atributo.

Cuando se habla de una aspiración de movimiento se dice que al momento de satisfacerse, está cancela la condición tabú del movimiento y una aspiración de atributo cuando se satisface cancela el estatus tabú del atributo.

Usualmente, la aspiración es utilizada si una configuración ocasionada por un movimiento es de muy buena calidad o algunas propiedades deseadas si no se trata de propiedades marcadas como tabú, es por ello que para las configuraciones elite son establecidas durante el proceso de optimización, si la nueva configuración provisional es mejor que cualquiera de las configuraciones de élite almacenadas, entonces debe

ser aceptado. Por otro lado, también podría valer la pena aceptar si contiene varias propiedades que forman parte de configuraciones de élite, para llegar a configuraciones aún mejores.

Uso de Memoria

La memoria se puede utilizar para identificar elementos que son comunes a las soluciones o a los caminos que conducen a esas, esta memoria es tanto explícita como atributiva:

- La memoria explícita registra soluciones completas a partir de las soluciones élite obtenidas durante la búsqueda. Las soluciones élite son las que permiten ampliar la búsqueda local, por tanto en algunos casos se ha utilizado memoria explícita para guiar la búsqueda pero es limitada (las estructuras de datos inteligentes deben ser diseñadas para evitar excesivos requisitos de memoria).
- La memoria atributiva registra información sobre los atributos de la solución que cambian al pasar de una solución a otra, por ejemplo, en un grafo o configuración de red, los atributos pueden consistir en nodos que se agregan, se quitan o se repositionan a través de diversos movimientos. La memoria atributiva hace que la búsqueda siga una dirección en concreto.

Así, se puede concluir que la memoria explícita facilita la creación entornos de búsqueda más amplios, ya que permite hacer el proceso de búsqueda local a través de soluciones élite mientras que la memoria atributiva reduce los entornos de búsqueda debido a que prohíbe ciertos movimientos (Glover y Laguna, 1997b).

Por otro lado, se tiene que la estructura de la memoria se soporta en cuatro dimensiones principalmente:

- **Calidad:** esta dimensión se basa en la capacidad de identificar el valor de cada una de las soluciones visitadas durante la búsqueda, evaluando elementos que son comunes a las mejores soluciones o caminos que conducen a ellas. La flexibilidad de este tipo de memoria permite guiar la búsqueda en un entorno que tenga múltiples objetivos, donde la dirección de búsqueda en particular puede ser determinada por más de una función.

- **Influencia:** considera el impacto de las elecciones realizadas durante la búsqueda, no sólo en la calidad, sino también en la estructura. La información de registro sobre la influencia de las elecciones sobre elementos particulares de la solución incorpora un nivel adicional de aprendizaje, es claro que ciertas decisiones tienen más influencia que otras en función de la vecindad encontrada a partir de los movimientos empleados.
- **Reciente:** esta es la dimensión más utilizada en las implementaciones de TS ya que mantiene un registro de los atributos de las últimas soluciones que se han encontrado, los atributos seleccionados se etiquetan como tabú-activos, y las soluciones que contienen elementos tabú-activos o combinaciones de estos atributos, son aquellos que se convierten en tabú. Esto evita que ciertas soluciones del pasado reciente pertenezcan a $N^*(x)$ y, por tanto, sean revisadas.
- **Frecuencia:** proporciona un tipo de información que complementa la información proporcionada por la dimensión "reciente" ampliando el rango para seleccionar movimientos preferidos. Hay dos tipos de frecuencias, por un lado están las frecuencias de transición que controlan la frecuencia con la cual cambian los atributos, por el otro lado están las frecuencias de residencia que rastrean la frecuencia con la cual los atributos son miembros de las soluciones generadas.

Intensificación y diversificación

Dos componentes muy importantes de TS son las estrategias de intensificación y diversificación. La estrategia de intensificación se refiere a la cantidad de esfuerzo empleado en la búsqueda de la región actual, se basan en la modificación de las reglas de elección para impulsar las combinaciones de movimientos y las características de la solución históricamente encontradas como buenas, también pueden iniciar un retorno a regiones atractivas para buscarlas más a fondo. Dado que las soluciones de élite deben ser registradas para examinar sus vecindades inmediatas, la memoria explícita está estrechamente relacionada con la implementación de estrategias de intensificación. Por otro lado, la estrategia de diversificación se refiere a la cantidad de esfuerzo empleado en regiones distantes del espacio de búsqueda, es decir, fomenta el proceso de búsqueda para examinar regiones no visitadas y generar soluciones que difieren de varias maneras significativas de las vistas antes. Una vez más, este en-

foque puede basarse en la generación de subconjuntos de componentes de solución que luego se expanden para producir soluciones completas (Glover y Laguna, 1997b).

La principal diferencia entre la intensificación y la diversificación es que durante la etapa de intensificación la búsqueda se centra en examinar a los vecinos de las soluciones de élite. Aquí el término **vecinos** tiene un significado más amplio que en el contexto habitual ya que además de considerar soluciones que son cercanas a soluciones de élite por medio de diversos mecanismos, las estrategias de intensificación generan "vecinos" que favorezcan la introducción de componentes en una solución actual (en evolución). Por otra parte, la etapa de diversificación fomenta el proceso de búsqueda para examinar regiones no visitadas y generar soluciones que difieren de manera significativa de las vistas antes. Este enfoque puede basarse en la generación de subconjuntos de componentes de solución para producir soluciones completas.

Las estrategias de intensificación requieren un medio para identificar un conjunto de soluciones de élite como base para incorporar buenos atributos en soluciones recién creadas. La pertenencia al conjunto de élite a menudo se determina estableciendo un umbral que está conectado al valor objetivo de la función de la mejor solución encontrada durante la búsqueda.

El equilibrio entre intensificación y diversificación es necesario para identificar de una manera rápida regiones del espacio con soluciones de buena calidad y para no consumir tiempo en espacio ya explorado.

La lógica de TS se puede observar en el pseudocódigo del algoritmo 1.

5.2 Aplicación de la Búsqueda Tabú a L-MIMO

Esta sección presenta uno de los aportes clave que se ha hecho con el desarrollo de esta Tesis y es presentar una propuesta de abstracción de *Tabu Search* para aplicarla a la Detección de Símbolos en L-MIMO.

Este fue un proceso arduo que demandó estrategias como: buscar guía en los trabajos de (Datta *et al.*, 2011) y (Chockalingam, 2010) a quienes se les escribió e-mail en repetidas ocasiones pero nunca hubo respuesta. Por tanto, fue necesario consultar con expertos en el tema de metaheurísticas y hubo una considerable cantidad de ensayo y error, pero al final fue muy gratificante el logro obtenido, que se encuentra más adelante en los resultados.

Ahora bien, como se mencionó anteriormente en la sección 4.3, los símbolos recibidos

Algorithm 1 Algoritmo de Tabu Search

```

Ajustar  $x \leftarrow x_0$ ;                                ▷ Solución inicial del candiato
Ajustar  $longitud(L) \leftarrow T$ ;                    ▷ Longitud máxima de la lista Tabú
Ajustar  $L \leftarrow \{\}$ ;                            ▷ Inicializar la lista Tabú
repetir
  Generar un vecindario aleatorio  $x!$ ;
  if  $x! \notin L$  then
    if  $longitud(L) > T$  then
      Remover la solución mas antigua de L;           ▷ cola FIFO
      Ajustar  $x! \in L$ ;
    end if
  end if
  if  $x! < x$  then
     $x \leftarrow x!$ 
  end if
until (Criterio satisfecho)                          ▷ e.g. Número de iteraciones
return  $x$                                            ▷ Mejor solución encontrada

```

por las N_R antenas ingresan simultáneamente al módulo receptor L-MIMO, el cual se encarga de detectar y recuperarlos, solo que por la interferencia generada por todas las antenas en transmisión y al ruido propio del canal, los símbolos se afectan y con la forma en que llegan al receptor se presentan errores, esto conlleva a que la detección de símbolos en recepción sea un proceso de alta complejidad, más cuando se tiene sistemas Large MIMO con un número considerable de antenas en transmisión.

La complejidad de la detección para el caso de ML es el número de cálculos de métrica necesarios para alcanzar la decisión de máxima verosimilitud. El número de cálculos de métrica ML [20] se puede determinar como $|A_S|^{N_T}$ donde A_S es el tamaño del alfabeto para el esquema de modulación M-ario utilizado y N_T es el número de antenas de transmisión. Por ejemplo, para un sistema MIMO 64x64 que emplea modulación 4-QAM, el número de cálculos es 4^{64} que es un número elevadísimo afectando su realización práctica real.

Para dar solución a este problema, en esta Tesis se proponen dos (2) Esquemas de Detección para sistemas Large MIMO, los cuales consisten en aplicar la Búsqueda Tabú (TS, *Tabu Search*) para buscar en la vecindad de la solución de ZF y en la vecin-

dad de la solución de MMSE.

De esta manera el Esquema de Detección toma la solución dada por el detector ZF o por el detector MMSE y el algoritmo de aplicación de TS propuesto, la utiliza como un vector solución inicial x_0 de tamaño $N_T \times 1$, con base a este vector se establece una métrica inicial $d_{min} = f(x_0) = \|Hx_0 - y\|^2$ y se agrega x_0 a una lista tabú (*tabu list*), posteriormente se busca en el vecindario $N(x_0) = n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_k$ compuesto por k vectores de tamaño $N_T \times 1$ en la vecindad del vector x_0 de forma que ninguno de estos vectores estén dentro de la lista tabú, luego se selecciona como vector candidato x_1 al vector n_i con la métrica $f(n_i)$ más baja y se agrega x_1 a la lista tabú.

Si la lista sobrepasa una determinada cantidad T de vectores (tamaño de la lista tabú), se elimina el primer vector de la lista y se agrega x_1 al final. Una vez determinado y almacenado x_1 se comprueba lo siguiente: si $f(x_1) < d_{min}$ entonces x_1 pasa a ser el vector solución, es decir $x_s = x_1$ y $d_{min} = f(x_1)$. Independientemente de que el vector candidato x_1 sea o no un vector solución, se procede nuevamente a buscar un vecindario $N(x_1)$ cercano a x_1 y el proceso se repite una cantidad M veces (iteraciones) encontrando los vectores candidatos x_1, x_2, \dots , hasta obtener x_M . De manera que al final de las M iteraciones el Esquema de Detección ZF-TS o el Esquema de Detección MMSE, entrega como vector solución a x_s .

En la figura 5.2 se presenta el diagrama de flujo de los dos Esquemas de Detección propuestos por cuanto la diferencia está en la solución inicial, que en uno es la de ZF y en el otro es tomar la de MMSE y luego se aplica el algoritmo de TS, el cual muestra los procesos que ejecuta el algoritmo en cuestión, en donde es de resaltar que entre mayor sea el número de iteraciones M , mayor será el tiempo que gasta el algoritmo en encontrar el vector solución x_s pero mayor será su efectividad.

Se recurrió a "ensayo y error" para determinar un valor de M que ofreciera balance entre alto desempeño y bajo tiempo de cómputo. Como resultado, en 4-QAM se encontró que para MMSE-TS eran suficientes 10 iteraciones, mientras que para ZF-TS se necesitaron 20. En el caso de 16-QAM el valor se dobló siendo necesarias 20 iteraciones para MMSE-TS y 40 para ZF-TS.

Con los procesos que ejecutan sea el Esquema de Detección ZF-TS o el Esquema de Detección MMSE-TS y su diagrama de flujo, en el algoritmo 2 se presenta el pseudocódigo correspondiente al mismo, se reitera que la diferencia está en la solución inicial (puede provenir de ZF o de MMSE), por eso este mismo algoritmo aplica para los dos Esquemas de Detección propuestos en esta Tesis.

Algorithm 2 Pseudocódigo Algoritmos ZF-TS y MMSE-TS

```

1: Inputs:
    Definir M (iteraciones) y T (tamaño tabu list)
    Recibir solución de ZF o de MMSE y asignarla a  $x_0$ 
2: Initialize:
     $shat \leftarrow x_0$  ▷  $\oplus$ :  $\hat{s}$ 
     $x_s \leftarrow x_0$ 
     $tabulist \leftarrow x_0$ 
     $d_{min} \leftarrow f(x_0)$ 
3: for  $i = 1$  hasta M do
4:   Ejecutar función ObtenerAlMejorEnElVecindario( $shat, y, H, shat_{new}, d_{min-new}, tabulist$ )
5:   if el tamaño de  $tabulist > T$  then
6:     Eliminar el primer vector de  $tabulist$ 
7:   end if
8:   Agregar  $shat_{new}$  en la última posición de  $tabulist$ 
9:    $shat \leftarrow shat_{new}$ 
10:  if  $d_{min-new} < d_{min}$  then
11:     $x_s \leftarrow shat_{new}$ 
12:     $d_{min} \leftarrow d_{min-new}$ 
13:  end if
14: end for

```

La función **ObtenerAlMejorEnElVecindario** se encarga de buscar en el vecindario cercano a **shat** (\hat{s}), y de elegir el vector candidato $shat_{new}$ que tenga la métrica más baja $d_{min-new}$. El pseudocódigo de esta función se presenta en el algoritmo 3 :

Algorithm 3 Pseudocódigo Función ObtenerAlMejorEnElVecindario

```

1: Initialize:
    $L \leftarrow \text{tamaño de } A$ 
    $N_T \leftarrow \text{No de Columnas de } H$ 
    $t \leftarrow 0$ 
2: for  $i = 1$  hasta  $N_T$  con incrementos de 1 do
3:   for  $j = 1$  hasta  $L$  con incrementos de 1 do
4:     if  $\text{shat}(i) \neq A(j)$  then
5:        $t \leftarrow t + 1$ 
6:        $\text{shat2} \leftarrow \text{shat}$ 
7:        $\text{shat2}(i) \leftarrow A(j)$ 
8:        $\text{neigh}(t) \leftarrow \text{shat2}$ 
9:     end if
10:  end for
11: end for
12:  $N =$  Todos los vectores del Vecindario diferentes a los vectores de la lista tabú
13:  $d_{\text{min-new}} =$  La menor métrica de los vectores que pertenecen a  $N$ 
14:  $\text{shat}_{\text{new}} =$  vector con la métrica  $d_{\text{min-new}}$ 

```

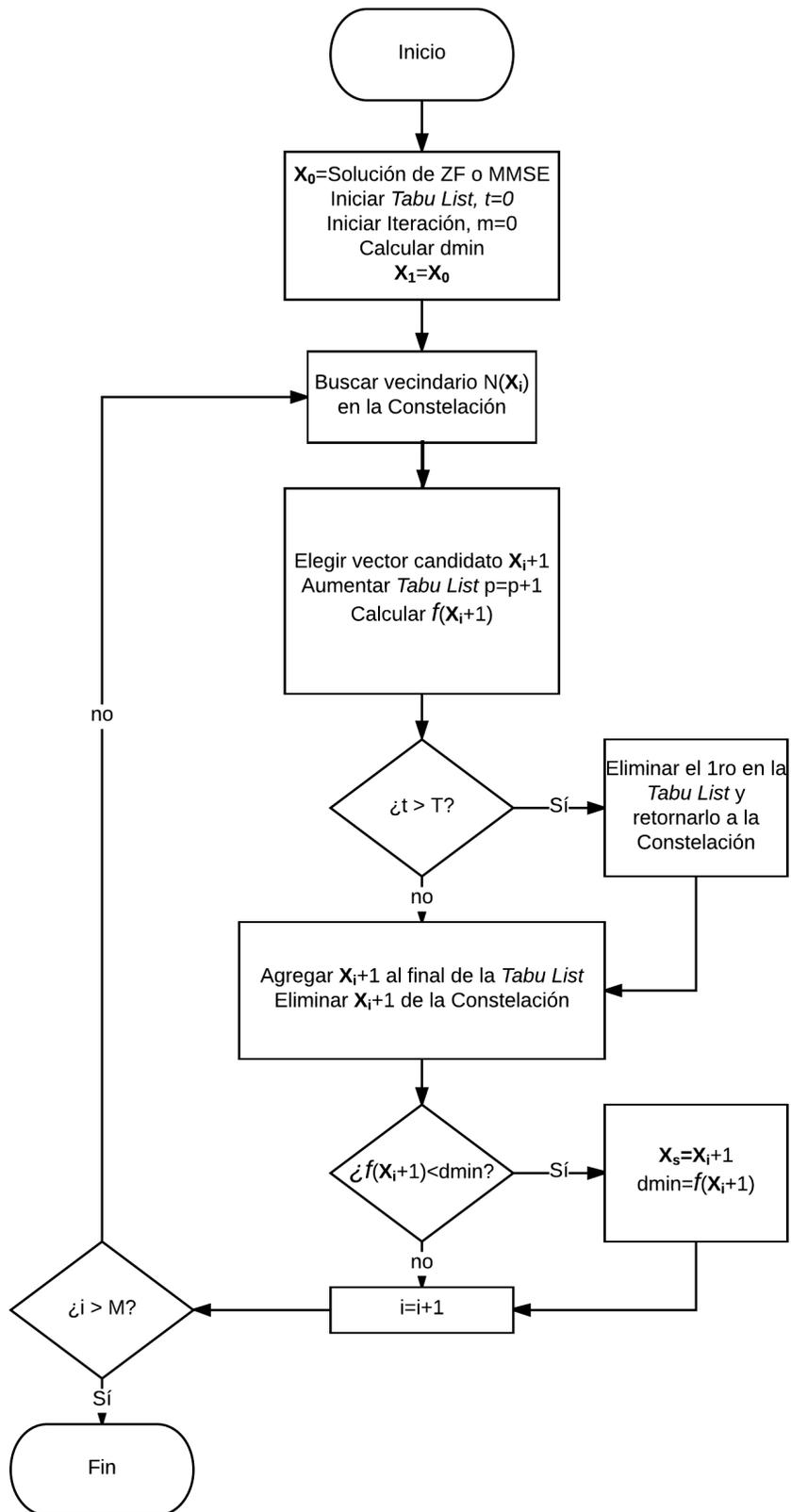


Figura 5.2. Diagrama de Flujo de los Algoritmos ZF-TS y MMSE-TS

Capítulo 6

Implementación y Resultados

En este capítulo se presenta el proceso realizado para la implementación de los Esquemas de Detección ZF-TS y MMSE-TS propuestos y sus resultados.

6.1 Selección del Ambiente de Simulación

Dentro de la búsqueda que se llevó a cabo para realizar la codificación de la aplicación de TS a la detección de símbolos en un sistema L-MIMO detallado en el capítulo anterior, se encontraron tres opciones principales que ofrecían el Ambiente de Simulación *Simulation Framework* apropiado, los cuales se relacionan a continuación:

- **IT++:** es una biblioteca en C++ de clases y funciones matemáticas, de procesamiento de señales y comunicación. Su principal uso es en la simulación de sistemas para realizar investigaciones en el área de las telecomunicaciones. La forma como está implementado el núcleo de esta librería hace que sea similar a MATLAB, GNU Octave o a SciPy (Bogdan *et al.*, 2013). Se conoció por el intercambio de correos con Erik Larsson autor de (Larsson *et al.*, 2014) y con Daniel Persson, autor de (Rusek *et al.*, 2013) quienes han aportado en el desarrollo IT++.
- **Detection MIMO Toolbox:** conjunto de programas realizados en MATLAB que implementan los detectores lineales ZF y MMSE y sus versiones SIC permitiendo calcular de forma comparativa la Tasa de Error de Símbolo (SER, *Symbol Error Rate*) y el tiempo de cómputo. Un elemento muy importante es que para efectos comparativos todos los detectores trabajan sobre los mismos datos y los mismos canales, y que aprovecha las capacidades de procesamiento paralelo del *Parallel Computing Toolbox* de MATLAB el cual permite hacer uso de procesadores

multicore, GPU y clústers de computadores. Se conoció por el Intercambio de correos con Javier Céspedes autor de (Céspedes *et al.*, 2014) y con Irene Santos autora de (Santos Velázquez, 2014) en la Universidad de Sevilla cuando se hizo la Pasantía Internacional.

- **MIMOPack 1.0**: conjunto de funciones optimizadas para realizar algunas de las etapas más complejas en sistemas MIMO. Es un paquete de software que contienen diversos detectores, entre los que se encuentran en el momento: ZF-SIC, ML, SE-SD, ASD, K-Best SD y HFCSD. Esta desarrollado sobre Linux y tiene la capacidad de soportarse en la Unidad de Procesamiento Gráfico (GPU, *Graphics Processor Unit*), para hacer que el procesamiento pueda ser acelerado y así obtener los resultados en un menor tiempo (INCO2-DSIC, 2015). Se conoció por entrevista con Alberto Gonzalez autor de (Ramiro *et al.*, 2015) en la Universidad Politécnica de Valencia cuando se hizo la Pasantía Internacional.

El análisis de estas opciones llevó a escoger la segunda opción por razones como: tener implementados los detectores de referencia que se necesitaban para fines de comparación, hacer uso del *Toolbox* de Procesamiento Paralelo de MATLAB (Math-Works, 2017) lo cual permitía aprovechar esta capacidad en los procesadores actuales y poder disminuir el tiempo de las simulaciones, por la forma de procesar los datos y hacer que fuera el mismo canal el que los afectara de tal manera que fuera igual lo que todos los detectores estaban procesando en paralelo y para las gráficas de resultados que generaba en las cuales estaban los dos elementos de interés para este trabajo: desempeño de SER vs SNR y el tiempo de Cómputo de los detectores.

Finalmente, el contar con el soporte de desarrollo de los grupos de Procesamiento de Señal de la Universidad Carlos III de Madrid y de la Universidad de Sevilla de España y el tener publicaciones en IEEE o Springer (como también ocurre con las otras dos opciones) en los que se había utilizado este ambiente de simulación permitían contar con una referencia para comparación validada y por tanto idónea para el aporte que se hiciera con esta Tesis.

6.2 Descripción del Ambiente de Simulación

A continuación se describe el funcionamiento del ambiente de simulación escogido y cómo se hace su parametrización para iniciar el proceso, para lo cual se comienza con

el diagrama de flujo general que se aprecia en la figura 6.1

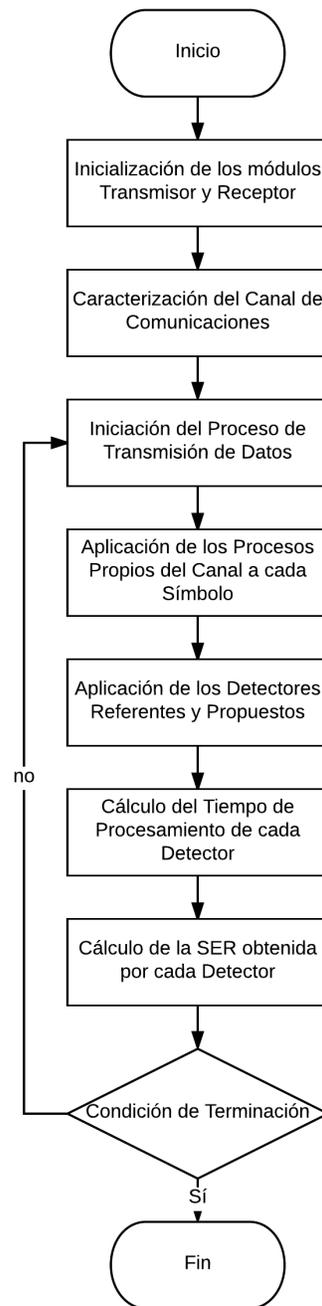


Figura 6.1. Diagrama de Flujo General del Ambiente de Simulación

Para la simulación se inicia con la definición del sistema, donde se establecen los siguientes elementos:

- Tamaño de la Constelación QAM

- Cantidad de Antenas de Transmisión N_T y Cantidad de Antenas en Recepción N_R
- Cantidad de Canales \mathbf{H} diferentes
- Cantidad de vectores transmitidos por cada canal \mathbf{H}
- Rango de Relaciones Señal a Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*)

Para la cantidad de canales y de símbolos, se siguió lo establecido en (Bottomley, 2012), donde se indica que es importante ejecutar la simulación el tiempo suficiente para obtener resultados de rendimiento precisos. Por ejemplo, en la medición de SER, una regla empírica comúnmente utilizada es garantizar que haya 100 eventos de error. Entonces, para medir SER en la región del 10%, se necesitan simular 1000 símbolos.

Teniendo en cuenta la expresión $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}$ establecida en la ecuación 4.1 se crea el vector de señal \mathbf{x} , el canal \mathbf{H} y el vector de ruido \mathbf{n} , y se pasan a las diferentes técnicas para su procesamiento. Esto es muy importante porque para comparar técnicas se hace necesario que \mathbf{x} , \mathbf{H} y \mathbf{n} no cambien entre llamadas a función de una técnica diferente.

Tanto \mathbf{s} como \mathbf{n} , mensaje y ruido respectivamente, son de varianza unitaria, por su parte \mathbf{H} es una matriz aleatoria normal con media cero y varianza unitaria.

Una vez hecha la creación de las variables y su inicialización, se procede a entregar todos los elementos anteriores a las funciones que implementan las diversas técnicas para que éstas efectúen su procesamiento en paralelo y entreguen resultados.

Finalmente se procede a la generación de las gráficas de resultados sobre desempeño de los detectores: SER vs SNR y tiempo de cómputo.

Para la implementación de la abstracción de TS para hacer su aplicación a la detección de símbolos en L-MIMO se desarrollaron (programaron e incluyeron) dos nuevas funciones denominadas ZF-TS y MMSE-TS cuyo código aparece en el Anexo 2.

6.2.1 Aportes realizados al Ambiente de Simulación

Una vez desarrolladas las funciones ZF-TS y MMSE-TS y viendo que éstas ya eran completamente operativas, se procedió a considerar introducir dos elementos al ambiente de simulación, que surgieron de la necesidad de contar elementos que facilitaran el proceso experimentación por simulación y el interés en aprovechar para aprender sobre el tema, los cuales se describen a continuación.

- **Interfaz Gráfica**

Se programó una Interfaz Gráfica que permitiera hacer selecciones con clic del ratón y evitar tener que estar entrando al código a buscar determinadas líneas donde se establecían: el tipo de modulación, cantidad de antenas en transmisión y recepción; o para comentar o descomentar líneas para definir las técnicas de detección que iban a entrar a operar. Esta interfaz con un enfoque minimalista pero funcional se aprecia en la figura 6.2

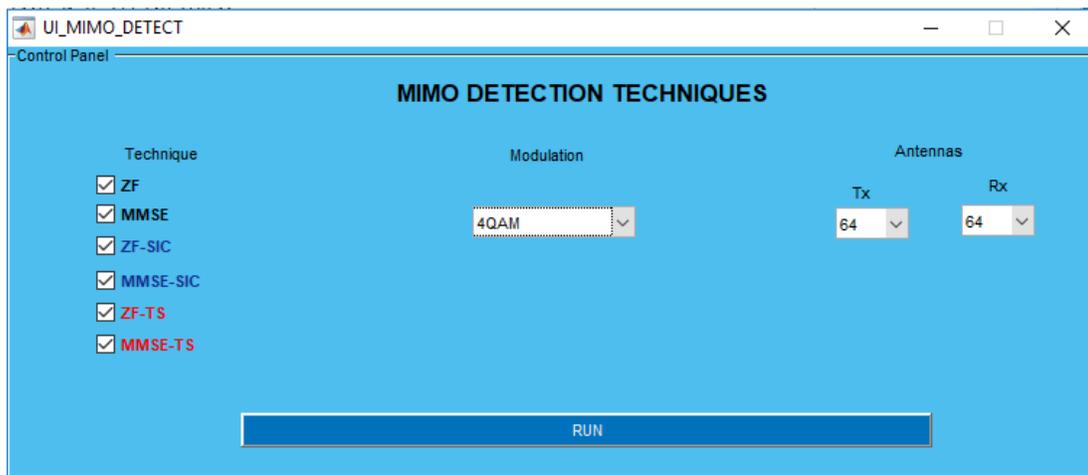


Figura 6.2. Interfaz Gráfica aportada al Ambiente de Simulación

- **Barra de Progreso**

En ocasiones, especialmente cuando se tenían un alto orden de antenas se tenía la inquietud sobre si la simulación seguía ejecutándose o el si era que el equipo se había bloqueado, por lo cual se programó una Barra de Progreso para poder saber si la simulación se seguía ejecutando y para poder proyectar el tiempo que aún podría ser necesario para que acabara y presentara los resultados. Este aporte se aprecia en la figura 6.3

6.3 Experimentación por Simulación y Resultados

Para efectos de evaluación comparativa del desempeño de las técnicas de detección, se trabajó con Matlab® r2015a haciendo uso del *Communications System Toolbox* recurriendo a cuatro equipos con 8 GB de RAM y procesador Intel® core i7; como este

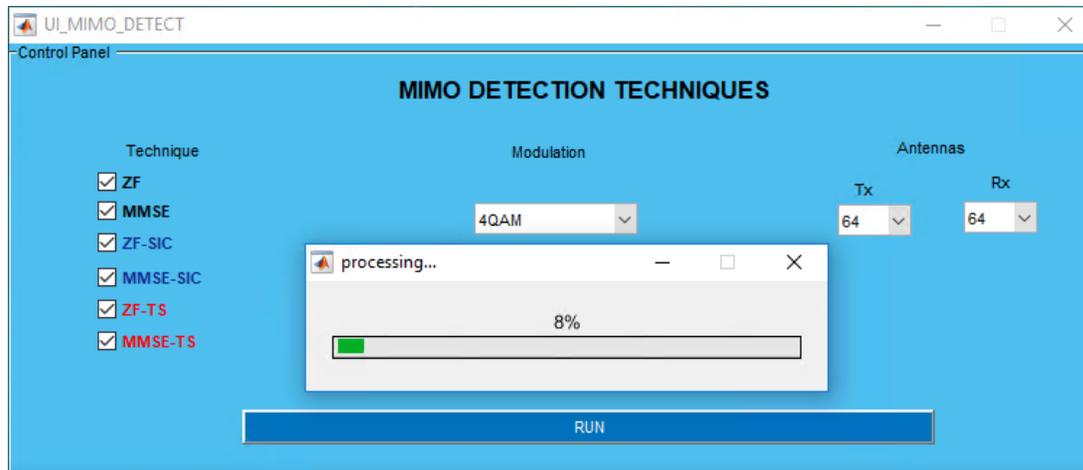


Figura 6.3. Barra de Progreso aportada al Ambiente de Simulación

procesador tienen cuatro núcleos se aprovecharon los beneficios del *Parallel Computing Toolbox* de Matlab particularmente para el caso *multicore* para llevar a cabo simulaciones extensas en un menor tiempo.

El uso de los cuatro equipos fue con la intención de tener varias simulaciones al tiempo y obtener así, los resultados en tiempos razonables que permitieran cumplir con los límites de tiempo del proyecto. La figura 6.4 evidencia tener corriendo varias simulaciones al tiempo en equipos diferentes y supervisadas con acceso remoto.

Se considera que aunque los valores puntuales seguramente cambiarán en implementaciones reales por la diferencia en las estructuras de datos y el manejo del agendamiento de procesos, entre otros, la tendencia en el desempeño de los algoritmos que permite proyectar el orden en que mejor realizan la detección, se debería mantener. De esta manera la situación de haber recurrido a simulación para obtención de resultados, obedece a la alta complejidad de una implementación real de L-MIMO especialmente en el nivel físico, de tal forma que no sería sencillo trabajarla en dispositivos como los Periféricos Universales de Radio por Software (USRP, *Universal Software Radio Peripherals*) y prácticamente esto queda para casos como los prototipos de investigación que se tienen en otras latitudes presentados en el capítulo 3.

Las simulaciones corresponden a cuatro órdenes de MIMO: 8x8, 16x16, 32x32 y 64x64, en los que se compararon en cuanto al desempeño y el tiempo de cómputo las técnicas: ZF, ZF-SIC, ZF-TS y MMSE, MMSE-SIC, MMSE-TS, que corresponden a los detectores lineales ZF y MMSE, sus versiones SIC y el aporte realizado en esta Tesis al proponer versiones TS (que aplican Tabu Search).

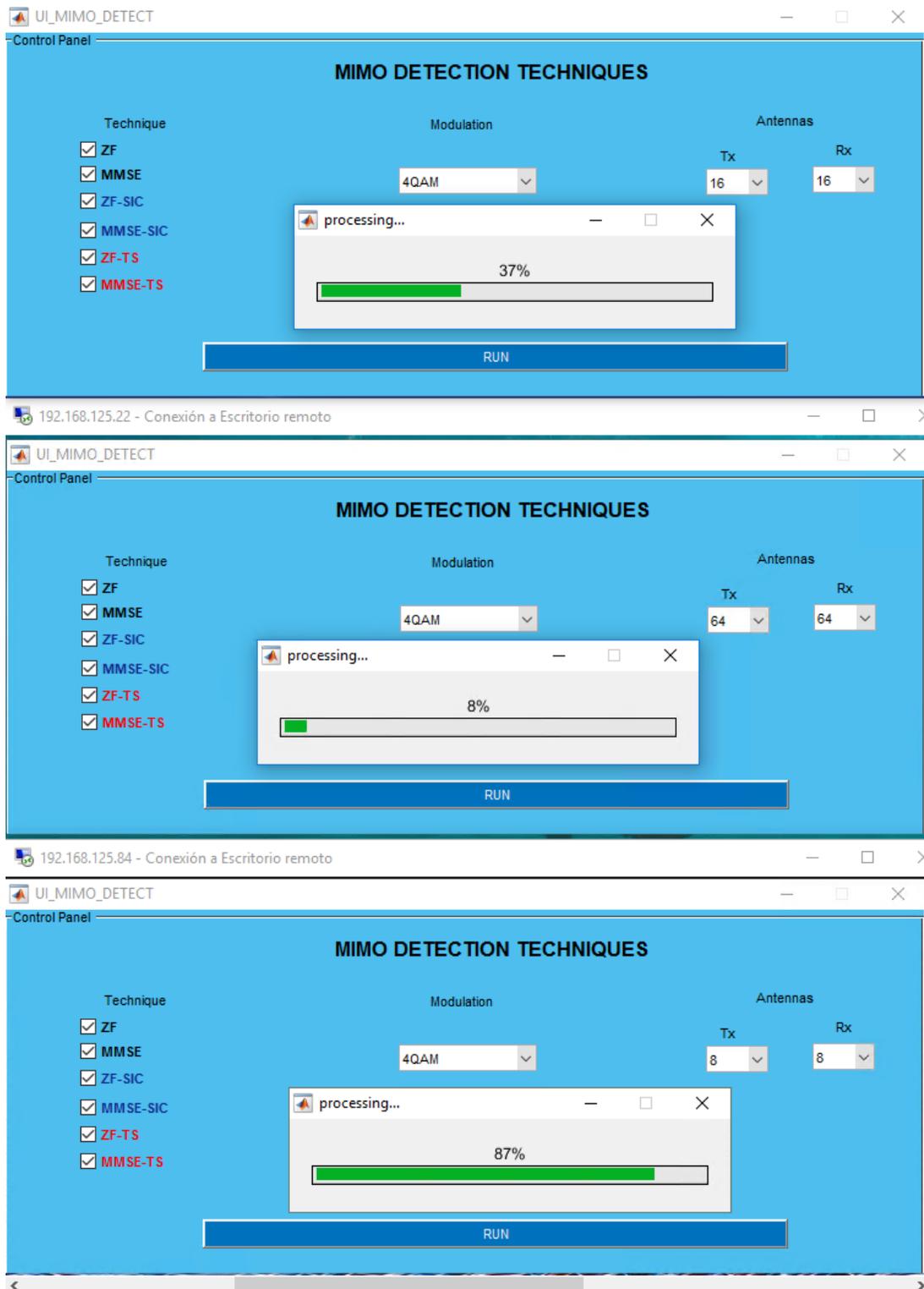


Figura 6.4. Equipos diferentes desarrollando las Simulaciones

Aunque algunos autores consideran L-MIMO a partir de 16×16 y Massive MIMO en configuraciones superiores a 64×64 , para el presente artículo se han tomado como referentes a (Nam *et al.*, 2015) y (Nam *et al.*, 2013) y lo explicado en los capítulos 2 y 3 en cuanto a su aplicación a la evolución de LTE particularmente el caso de LTE-A PRO que consideran que desde 32×32 se pueden tener los beneficios señalados para L-MIMO. Por lo anterior en las secciones siguientes se presentan los resultados que más importan, es decir, 32×32 y 64×64 . En el Anexo 2 se presentan resultados adicionales de 16×16 y 8×8 por interés de conocer el desempeño en órdenes más bajos y porque sus tiempos de simulación permitían obtenerlos y aportarlos en este documento.

En las gráficas de desempeño SER vs SNR, el rango se ha establecido entre 0 dB y 30 dB para SNR por ser valores típicos en aplicaciones de comunicaciones inalámbricas. Por otra parte las modulaciones que se evaluaron 4-QAM y 16-QAM son características en distancias lejanas y medias a la estación base, por lo tanto se conserva la coherencia con la realidad de funcionamiento de las tecnologías.

En la figura 6.5 se aprecian las convenciones que se establecieron para los detectores de tal forma que fuera más inmediata su ubicación y se facilitara la comparación, en este sentido:

- Para los detectores que se proponen en esta Tesis se utiliza el color rojo, con rombo para MMSE-TS y cuadrado para ZF-TS
- Para las versiones SIC de los detectores lineales se utiliza el color azul, con triángulo hacia la derecha para MMSE-SIC y triángulo hacia arriba para ZF-SIC
- Para los detectores lineales se utiliza el color negro, con circunferencia para MMSE y un asterisco para ZF-TS

En las gráficas de tiempo de cómputo, los resultados se han organizado en grupos de izquierda a derecha para que primero aparezcan los detectores lineales, luego sus variantes SIC y finalmente los que se proponen en esta Tesis que hacen uso de TS

6.3.1 Resultados para 4-QAM

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al ejecutar las simulaciones con 4-QAM. Primero los resultados de desempeño SER vs SNR y a continuación los del tiempo de cómputo necesario para cada función al realizar su procesamiento. Para

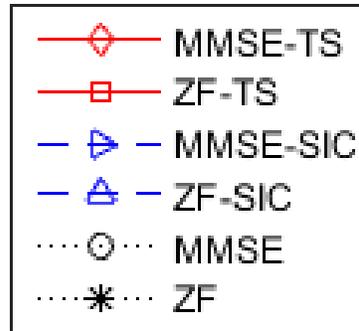


Figura 6.5. Convenciones para Identificar a los Detectores

este caso se tienen configuradas 20 iteraciones para ZF-TS y 10 iteraciones para MMSE-TS.

L-MIMO 32x32

En la figura 6.6 se aprecia como MMSE-TS ofrece el mejor desempeño en el rango completo de evaluación y que ZT-TS frente a ZF-SIC lo hace solamente hasta relaciones SNR cercanas a los 17 dB. En cuanto al tiempo de cómputo, en la figura 6.7 se puede ver que lo requiere MMSE-TS es ligeramente menor que lo que requiere MMSE-SIC. Aunque ZF-TS tiene un menor tiempo que ZF-SIC, ambos exhiben los tiempos más altos.

Ahora bien, lo más importante es que viendo el desempeño de MMSE-TS con respecto al tiempo que requiere, se puede considerar que es totalmente justificado su uso, puesto que ofrece un excelente desempeño frente al tiempo de cómputo, inclusive frente al tiempo que requiere su contraparte lineal MMSE.

L-MIMO 64x64

Subiendo el orden de MIMO se obtienen los resultados para 64 x 64, de esta forma en la figura 6.8 se aprecia como MMSE-TS ofrece el mejor desempeño en el rango completo de evaluación, y mejor que en 32x32, pero ZT-TS aunque sigue de cerca al inicio, ya no logra superar el desempeño de su contraparte SIC y se aleja a partir de relaciones SNR cercanas a los 17 dB. En cuanto al tiempo de cómputo, en la figura 6.9 sin lugar a dudas el tiempo que demanda MMSE-TS es **notoriamente** menor frente al que requiere MMSE-SIC.

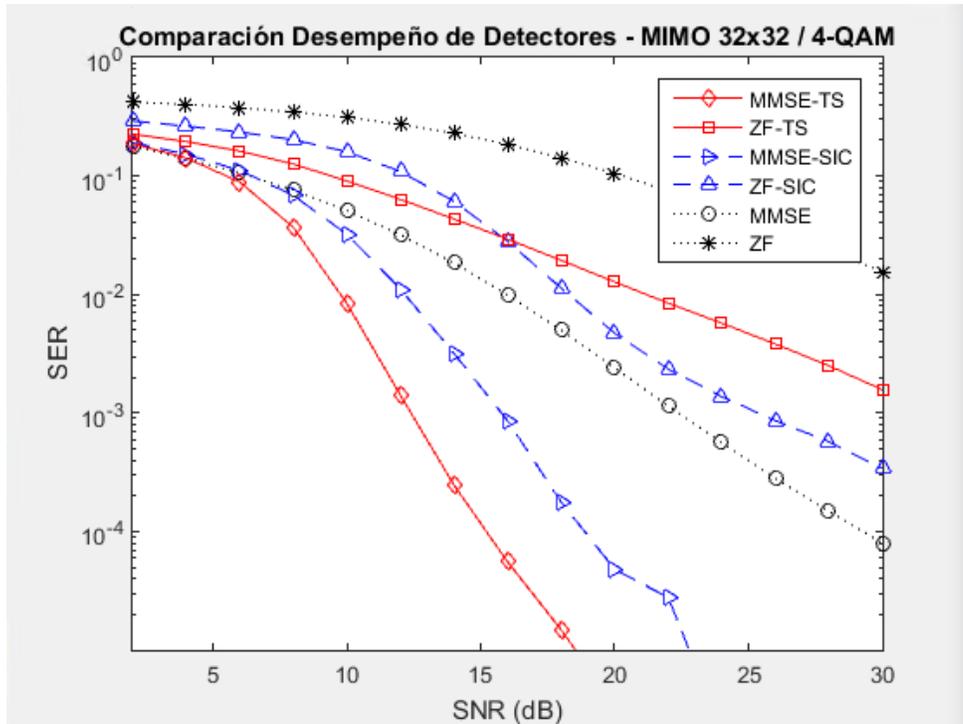


Figura 6.6. Desempeño MIMO 32 x 32 - 4QAM

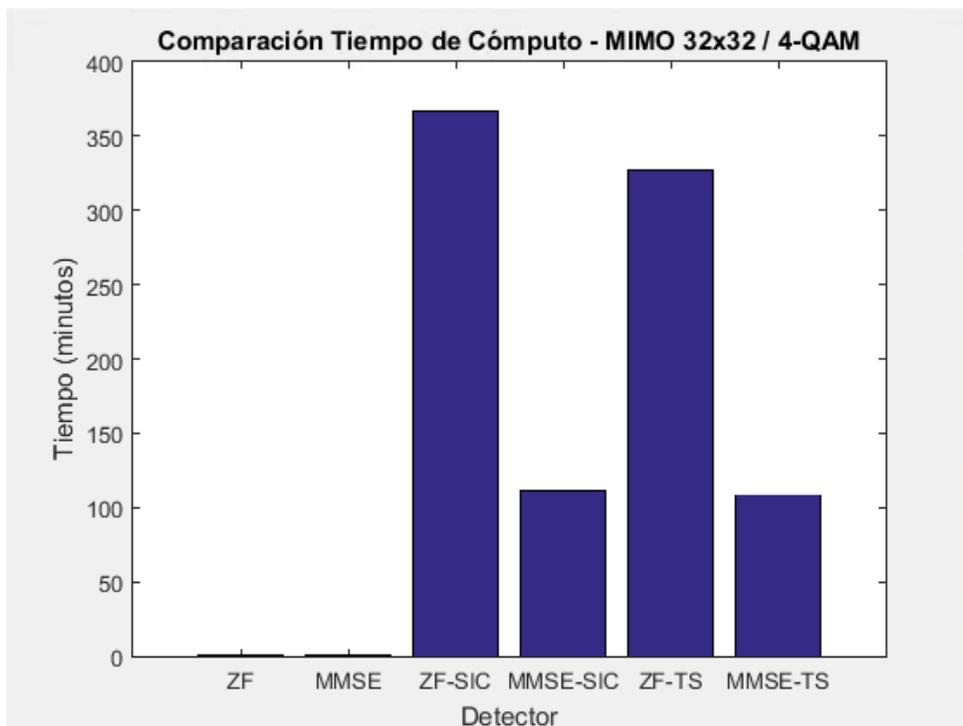


Figura 6.7. Tiempo de Cómputo MIMO 32 x 32 - 4QAM

Por tanto, es claro el logro que se ha obtenido con la aplicación de TS a la Detección de Símbolos en L-MIMO y los beneficios que la Búsqueda Tabú ofrece para este propósito son totalmente evidentes. Es también importante comentar que era de interés saber si en su forma original y sin ninguna de sus variantes TS lograba buenos resultados y efectivamente lo hace.

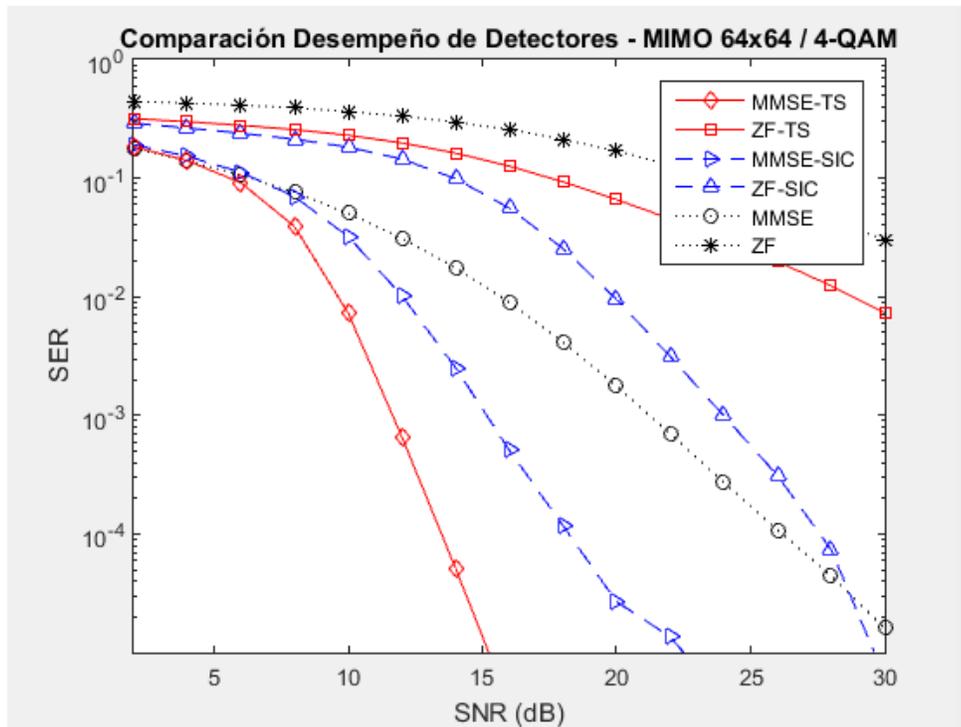


Figura 6.8. Desempeño MIMO 64 x 64 - 4QAM

6.3.2 Resultados para 16-QAM

A continuación se presentan los resultados obtenidos al ejecutar las simulaciones con 16-QAM. En forma similar a 4-QAM primero aparece la comparación de desempeño SER vs SNR y luego el tiempo que ha sido necesario para realizar su procesamiento. Para este caso se tienen configuradas 40 iteraciones para ZF-TS y 20 iteraciones para MMSE-TS

L-MIMO 32x32

En la figura 6.10 se aprecia como MMSE-TS ofrece el mejor desempeño hasta relaciones SNR cercanas a los 23 dB siendo casi el 70% del rango de evaluación y que

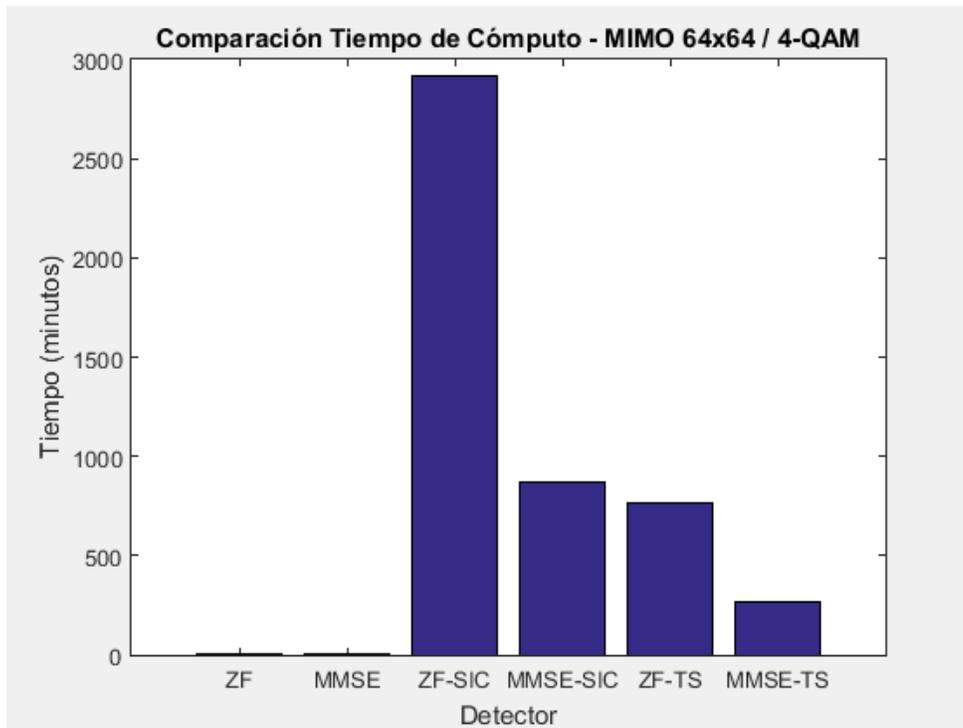


Figura 6.9. Tiempo de Cómputo MIMO 64 x 64 - 4QAM

ZT-TS frente a ZF-SIC lo hace solamente hasta SNR cercanas a los 21 dB. En cuanto al tiempo de cómputo, en la figura 6.11 se ve que las propuestas con TS demandan mayor tiempo pero que MMSE-TS no se aleja mucho de su contraparte MMSE-SIC.

Para este nivel de modulación se aprecia que MMSE-TS ofrece un desempeño que sigue al de MMSE-SIC y que el tiempo que requiere aunque es mayor no es tan alto y podría considerarse dando mayor ponderación al desempeño.

L-MIMO 64x64

Al subir el orden de MIMO para los resultados de 64 x 64, se aprecia en la figura 6.12 como MMSE-TS ofrece el mejor desempeño en el 90% del rango de evaluación lo cual es mejor que en 32x32, y que ZT-TS aunque como en el caso de 4QAM sigue de cerca al inicio, ya no logra superar el desempeño de su contraparte SIC y se aleja a partir de relaciones SNR cercanas a los 17 dB. En cuanto al tiempo de cómputo, en la figura 6.13 el tiempo de MMSE-TS es mayor que el de su contraparte MMSE-SIC pero es notoriamente cercano al mismo.

Por tanto, para este caso, la aplicación de TS a la Detección de Símbolos en L-

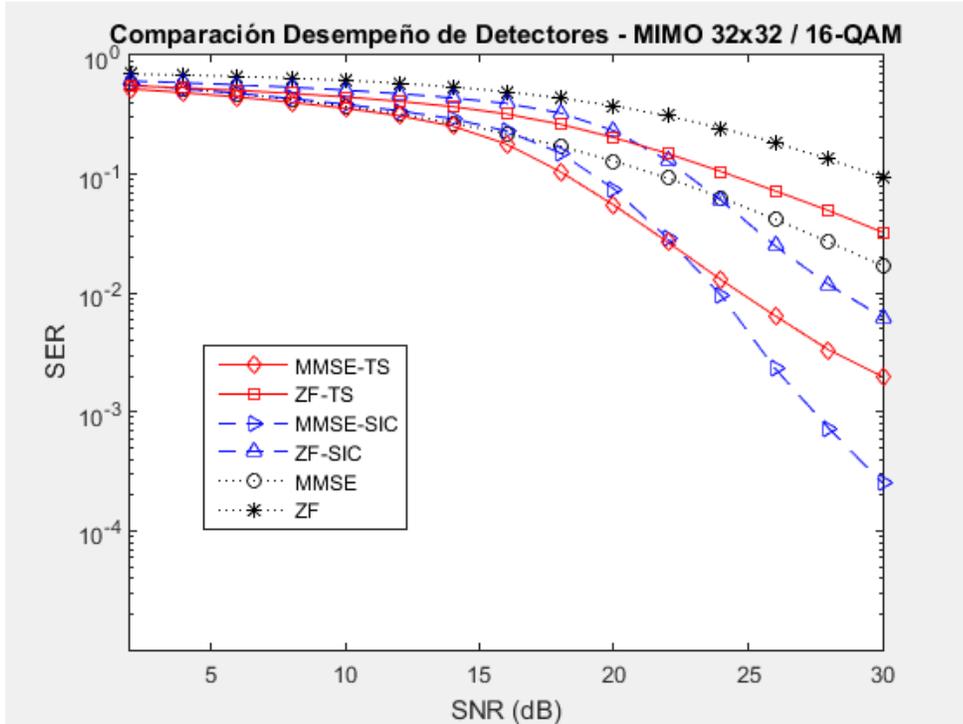


Figura 6.10. Desempeño MIMO 32 x 32 - 16 QAM

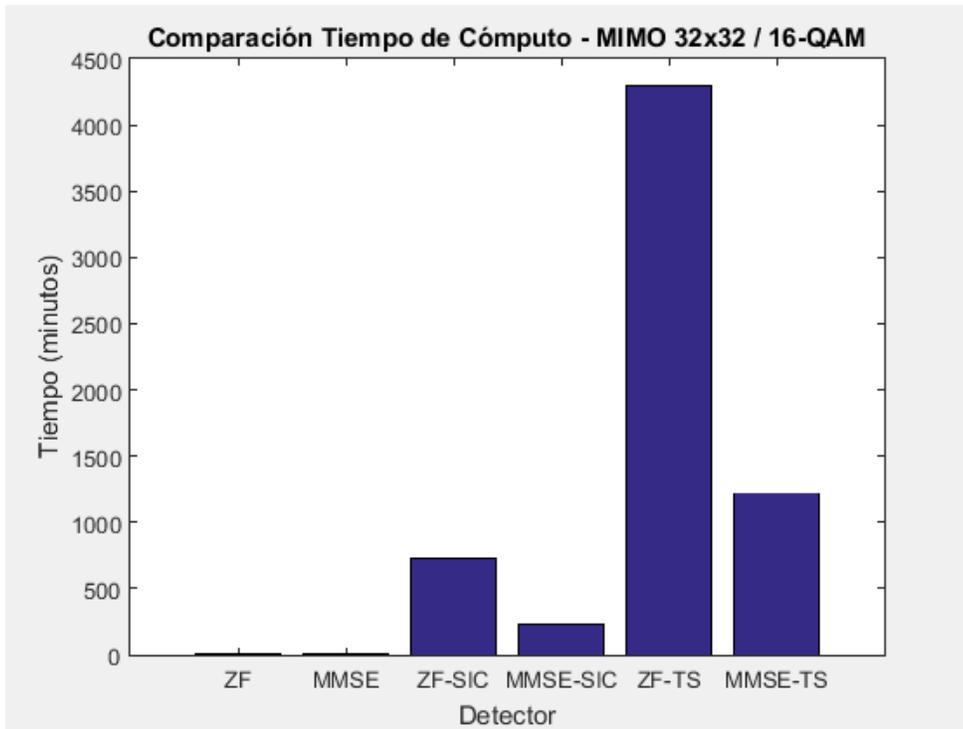


Figura 6.11. Tiempo de Cómputo MIMO 32 x 32 - 16 QAM

MIMO ofrece en la mayor parte un mejor desempeño con el detector propuesta MMSE-TS pero ya el tiempo que toma es mayor que el de MMSE-SIC, lo bueno es que es queda bastante cercano y más aún en 64x64.

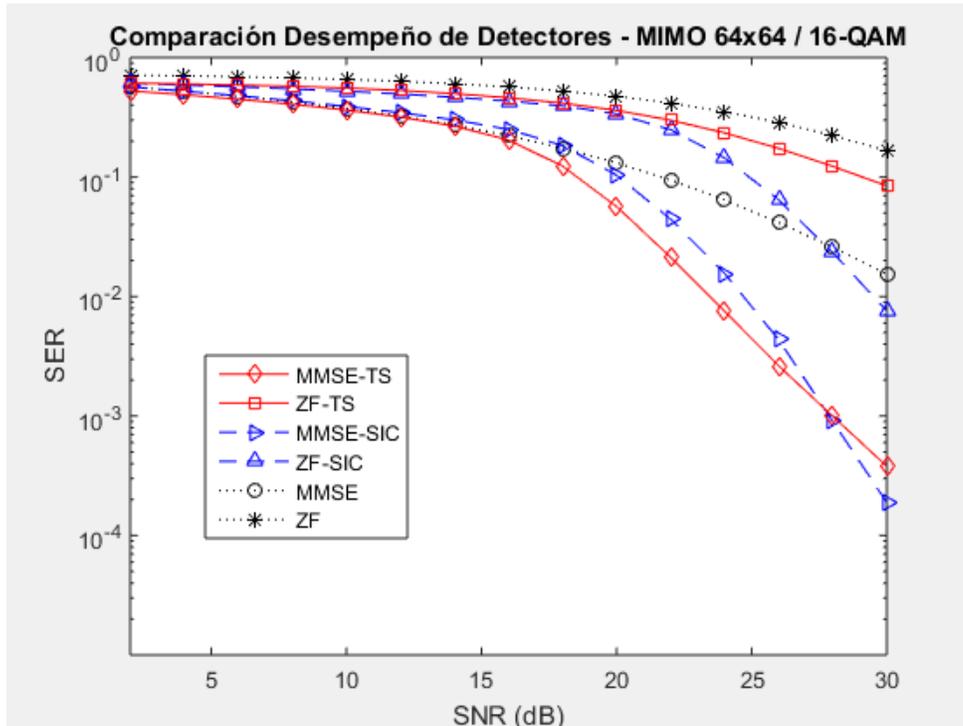


Figura 6.12. Desempeño MIMO 64 x 64 - 16 QAM

De acuerdo con los resultados obtenidos, el Esquemas de Detección propuesto MMSE-TS superan evidentemente el desempeño de los referentes lineales ZF y MMSE y en 4QAM el de sus versiones SIC, lo hace de una forma muy notoria en cuanto a desempeño y cuanto al tiempo en la configuración más demandante 64x64 requiere un tiempo de cómputo menor. Por su parte ZF-TS tiene la capacidad de ofrecer mejor desempeño que ZF y ZF-SIC pero demandaría de un número mayor de iteraciones lo cual elevaría el tiempo cómputo, lo cual va en contravía de la baja complejidad.

Por otra parte en 16-QAM, el Esquema MMSE-TS no consigue resultados tan satisfactorios como en 4QAM pero se mantiene en la línea de ofrecer mejor desempeño entre más alto es el orden de MIMO y mantener tiempos de cómputo relativamente bajos que quedan muy cerca de MMSE-SIC pero que lo hacen sobresaliente dándole mayor importancia al desempeño.

Ahora bien tanto ZF-TS como MMSE-TS tienen dos parámetros que inciden sobre su desempeño: la cantidad de iteraciones y el tamaño de la Lista Tabú, para escenarios

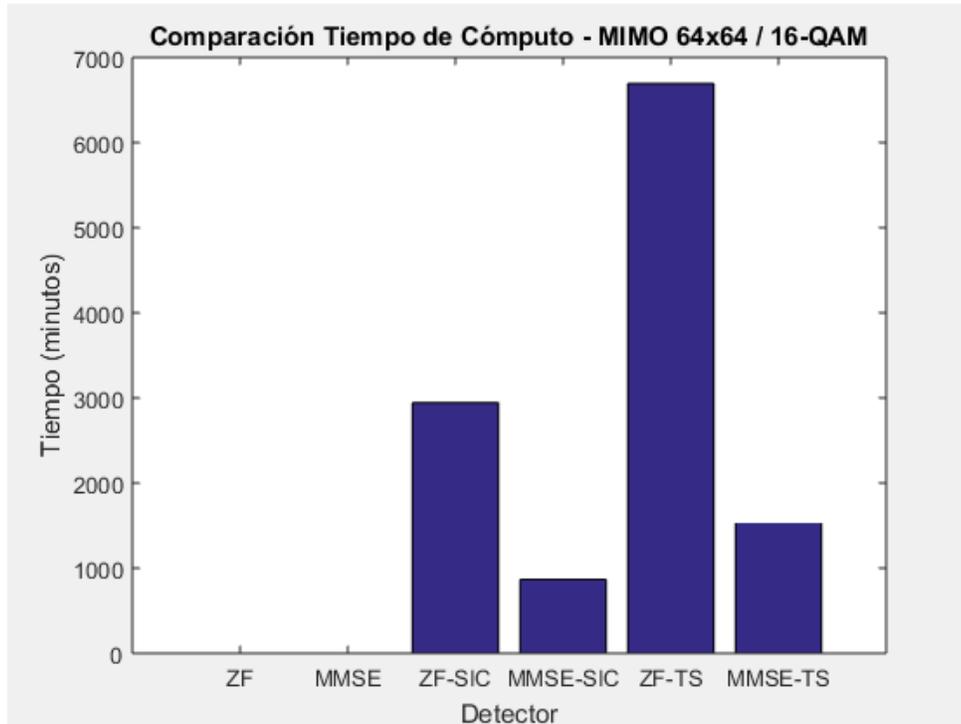


Figura 6.13. Tiempo de Cómputo MIMO 64 x 64 - 16 QAM

demandantes como 16-QAM , se podría conseguir un mejor desempeño aumentando sus valores para estimar si los beneficios que se obtengan puedan llegar a justificar el que el mayor tiempo de cómputo se compense con las capacidades de procesamiento paralelo que traen las GPU de los dispositivos.

Pero queda claro que en el borde de celda donde se tienen bajas modulaciones y SNR, que es el escenario de 4QAM el mejor desempeño de MMSE-TS es evidente y se convierte en un aporte claro para el proceso de Detección de Símbolos en L-MIMO.

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajos Futuros

7.1 Conclusiones

Una vez culminado el trabajo que fue necesario para el logro de los objetivos de esta Tesis, habiendo profundizado en las tecnologías involucradas y obtenido resultados, a continuación se relacionan las siguientes conclusiones:

La tecnología L-MIMO ha abierto la posibilidad para el logro de beneficios importantes en los sistemas de comunicaciones móviles que serán necesarios en un futuro cercano para atender las necesidades de velocidades más altas, mayores capacidades, mayor seguridad, menor consumo de energía, entre otros. Pero el costo y dificultades de implementación práctica establecer retos importantes que deben ser abordados generando nichos de investigación.

La búsqueda de soluciones para atender la cada vez más creciente demanda de velocidad en las redes móviles actuales y las proyecciones hacia 5G ha tenido que propender por formas de hacer viable la teoría de L-MIMO por las ventajas que ésta ofrece, a pesar de sus grandes dificultades de realización práctica y es interesante como esto a su vez se ha convertido en un impulsor del estudio de la operación de sistemas en bandas como las de mmWave que inicialmente habían sido descartadas para aplicación al mundo móvil celular.

Particularmente la tecnología FD-MIMO llevará a la práctica beneficios de MIMO Masivo, al ser ya aceptada por el 3GPP para el *release* 13, por tanto, se hace necesario considerar su estudio y temas particulares como los nuevos modelos 3D que permiten trabajar tanto con el dominio acimutal como con el dominio de elevación.

La búsqueda de opciones para solventar la complejidad en la detección de señal en ambientes L-MIMO donde se usa un gran número de antenas, es viable con el uso de técnicas metaheurísticas. Por tanto, se tienen oportunidad para la investigación en

algoritmos que ofrezcan baja complejidad con el aumento del nivel de procesamiento a realizar, considerando el uso de técnicas de detección lineales como ZF y MMSE (sin SIC) dada su bajo tiempo de ejecución para ser la primera etapa de algoritmos híbridos que en la segunda mejoren su desempeño con la aplicación de técnicas diversas como metaheurísticas y en general *soft-computing*.

Tanto ZF-TS como MMSE-TS ofrecen mejoras de desempeño, pero MMSE-TS hace un notable aporte en 4-QAM al haber superado en desempeño al mejor referente y tener un tiempo de procesamiento similar en configuraciones L-MIMO de 32x32, pero especialmente en la configuración de 64x64 donde su desempeño SER vs SNR es significativamente alto y el tiempo que requiere para su procesamiento es notoriamente menor.

En órdenes altos de L-MIMO la detección basada en TS podría aún seguir teniendo una complejidad elevada para una implementación real, pero no puede desestimarse su aporte, más cuando algo que podrá ayudar en este sentido serán las capacidades de procesamiento *multicore* o con GPUs, contexto en el que la computación se ha venido soportando desde hace algunos años, y que como para el caso de las simulaciones realizadas en este proyecto, el procesamiento en paralelo ha facilitado obtener resultados en un menor tiempo, pues, el procesamiento era demasiado elevado, teniendo que trabajar el tiempo con varios esquemas y configuraciones para evaluar.

El haber considerado el uso de las técnicas ZF y MMSE (sin SIC) dada su bajo tiempo de ejecución para ser la primera etapa de algoritmos híbridos que en la segunda mejoren su desempeño con la aplicación de TS, ha demostrado ser una estrategia que funciona, por tanto se abre la posibilidad a diseñar y evaluar otras combinaciones.

La metaheurística TS en su forma original si funciona para la Detección de Símbolos en L-MIMO, esto permite concluir "a priori" que las variantes que existen sobre la misma pueden hacer aportes que sería interesante determinar.

7.2 Trabajos Futuros

En trabajos futuros se podrían:

- Evaluar órdenes más altos de L-MIMO tales como 128x128 y de modulación como 64-QAM.
- Abstraer y aplicar otras técnicas de bajo costo computacional provenientes del

área de las metaheurísticas y *soft-computing* a los esquemas de detección en L-MIMO.

- Considerar la viabilidad de implementación de los algoritmos en ambientes de desarrollo distintos como IT++ y MIMO Pack para verificar la concordancia de los resultados.
- Hacer evaluaciones de variantes de TS para establecer las mejoras que éstas podrían introducir en el Diseño de Esquemas para Detección de Símbolos en L-MIMO.

Referencias

- 3GPP (2015). LTE-Advanced Pro Ready to Go. [urlhttp://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1745-lte-advanced-pro](http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1745-lte-advanced-pro).
- 3GPP (2017). Releases. [urlhttp://www.3gpp.org/specifications/67-releases](http://www.3gpp.org/specifications/67-releases).
- Alvaro, G. S. (2007). Técnicas metaheurísticas. p. 3.
- Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C., y Zhang, J. C. (2014a). What will 5g be? *IEEE Journal on selected areas in communications*, 32(6):1065–1082.
- Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C. K., y Zhang, J. C. (2014b). What Will 5G Be? [url http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6824752](http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6824752).
- Ayscom (2015). Todo lo que se sabe del 5G | Ayscom. [urlhttps://www.ayscom.com/es/todo-lo-que-necesitas-saber-del-5-g/](https://www.ayscom.com/es/todo-lo-que-necesitas-saber-del-5-g/).
- Ayscom (2017). Todo lo que se sabe del 5g. [urlhttp://www.ayscom.com/es/todo-lo-que-necesitas-saber-del-5-g/](http://www.ayscom.com/es/todo-lo-que-necesitas-saber-del-5-g/).
- Bai, L. y Choi, J. (2012). *Low complexity MIMO detection*. Springer Science & Business Media.
- Bai, L., Choi, J., y Yu, Q. (2014). *Low complexity MIMO receivers*. Springer Science & Business Media.
- Bashir, S., Khan, A. A., Naeem, M., y Shah, S. I. (2007). An application of ga for symbol detection in mimo communication systems. En *Natural Computation, 2007. ICNC 2007. Third International Conference on*, volumen 2, pp. 404–410. IEEE.

- Björnson, E., Hoydis, J., Kountouris, M., y Debbah, M. (2013). Hardware impairments in large-scale mimo systems: Energy efficiency, estimation, and capacity limits. En *Digital Signal Processing (DSP), 2013 18th International Conference on*, pp. 1–6. IEEE.
- Björnson, E., Hoydis, J., Kountouris, M., y Debbah, M. (2014a). Massive mimo systems with non-ideal hardware: Energy efficiency, estimation, and capacity limits. *IEEE Transactions on Information Theory*, 60(11):7112–7139.
- Björnson, E., Sanguinetti, L., Hoydis, J., y Debbah, M. (2014b). Designing multi-user mimo for energy efficiency: When is massive mimo the answer? En *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014 IEEE*, pp. 242–247. IEEE.
- Boccardi, F., Heath, R. W., Lozano, A., Marzetta, T. L., y Popovski, P. (2014). Five disruptive technology directions for 5g. *IEEE Communications Magazine*, 52(2):74–80.
- Bogdan, C., Ottosson, T., y Pityszek, A. (2013). It++ a c++ library of mathematical, signal processing and communication classes and functions. url-<http://itpp.sourceforge.net/4.3.1/index.html>.
- Bottomley, G. E. (2012). *Channel equalization for wireless communications: from concepts to detailed mathematics*, volumen 20. John Wiley & Sons.
- Cespedes, J., Olmos, P. M., Sanchez-Fernandez, M., y Perez-Cruz, F. (2014). Expectation propagation detection for high-order high-dimensional mimo systems. *IEEE Transactions on Communications*, 62(8):2840–2849.
- Cho, Y. S., Kim, J., Yang, W. Y., y Kang, C. G. (2010a). *MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB*. John Wiley & Sons.
- Cho, Y. S., Kim, J., Yang, W. Y., y Kang, C. G. (2010b). Signal detection for spatially multiplexed mimo systems. *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB®*, pp. 319–371.
- Chockalingam, A. (2010). Detection, low-complexity algorithms for large-mimo. En *4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, pp. 1–6.

- Chockalingam, A. y Rajan, B. S. (2014). *Large MIMO systems*. Cambridge University Press.
- Cirila, R. C. A. (2005). Conceptos, algoritmo y aplicación al problema de las n reinas. capítulo3: Búsqueda de tabú. *Universidad Nacional Mayor De San Marcos*, pp. 32–50.
- Čirkić, M. (2014). *Efficient MIMO Detection Methods*. Tesis doctoral, Linköping University Electronic Press.
- Čirkić, M. y Larsson, E. G. (2012). Sumis: A near-optimal soft-output mimo detector at low and fixed complexity. *CoRR*, *abs/1207.3316*.
- Cisco (2017). Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021 White Paper. [urlhttps://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html](https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html).
- Daniels, G. (2017). The eyes have it: First 5g New Radio standard to be ready by March 2018. [urlhttp://www.telecomtv.com/articles/5g/the-eyes-have-it-first-5g-new-radio-standard-to-be-ready-by-march-2018-14448/](http://www.telecomtv.com/articles/5g/the-eyes-have-it-first-5g-new-radio-standard-to-be-ready-by-march-2018-14448/).
- Datta, T., Kumar, N. A., Chockalingam, A., y Rajan, B. S. (2013). A novel monte-carlo-sampling-based receiver for large-scale uplink multiuser mimo systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62(7):3019–3038.
- Datta, T., Srinidhi, N., Chockalingam, A., y Rajan, B. S. (2011). A hybrid rts-bp algorithm for improved detection of large-mimo m-qam signals. En *Communications (NCC), 2011 National Conference on*, pp. 1–5. IEEE.
- Dean, T. R. y Goldsmith, A. J. (2017). Physical-layer cryptography through massive mimo. *IEEE Transactions on Information Theory*, 63(8):5419–5436.
- Dreo, J. (2007). Different classifications of metaheuristics.
- Du, D.-Z. y Pardalos, P. M. (2013). *Handbook of combinatorial optimization: supplement*, volumen 1. Springer Science & Business Media.
- Edfors, O., Liu, L., Tufvesson, F., Kundargi, N., y Nieman, K. (2016). Massive mimo for 5g: Theory implementation and prototyping. *Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementations*, pp. 189–230.

- Flordelis, J., Gao, X., Dahman, G., Rusek, F., Edfors, O., y Tufvesson, F. (2015). Spatial separation of closely-spaced users in measured massive multi-user mimo channels. En *Communications (ICC), 2015 IEEE International Conference on*, pp. 1441–1446. IEEE.
- Foschini, G. J. (1996). Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. *Bell labs technical journal*, 1(2):41–59.
- Ghadialy, Z. (2015). LTE-Advanced Pro (a.k.a. 4.5G). [urlhttp://blog.3g4g.co.uk/2015/12/lte-advanced-pro-aka-45g.html](http://blog.3g4g.co.uk/2015/12/lte-advanced-pro-aka-45g.html).
- Ghadialy, Z. (2017). Self-backhauling: Integrated access and backhaul links for 5G. [urlhttp://blog.3g4g.co.uk/search/label/Backhaul](http://blog.3g4g.co.uk/search/label/Backhaul).
- Glover, F. y Laguna, M. (1997a). *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA.
- Glover, F. y Laguna, M. (1997b). *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers.
- Glover, F. y Laguna, M. (2007a). Principles of tabu search. *OptTek Systems, Inc. and University of Colorado, Boulder*, pp. 2–3.
- Glover, F. y Laguna, M. (2007b). Principles of tabu search. *OptTek Systems, Inc. and University of Colorado, Boulder*, p. 4.
- Glover, F. y Laguna, M. (2013). Tabu search: Effective strategies for hard problems in analytics and computational science. *OptTek Systems, Inc. and University of Colorado, Boulder*, p. 3.
- Goldsmith, A. (2005). *Wireless communications*. Cambridge university press.
- Golub, G. H. y Van Loan, C. F. (1996). *matrix computations*, 3rd.
- Hoydis, J., Ten Brink, S., y Debbah, M. (2013). Massive mimo in the ul/dl of cellular networks: How many antennas do we need? *IEEE Journal on selected Areas in Communications*, 31(2):160–171.
- Huh, H., Caire, G., Papadopoulos, H. C., y Ramprasad, S. A. (2012). Achieving "massive mimo" spectral efficiency with a not-so-large number of antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 11(9):3226–3239.

- INCO2-DSIC (2015). Mimopacka high performance library for mimo communication systems. [urlhttp://www.inco2.upv.es/mimopack/index.html](http://www.inco2.upv.es/mimopack/index.html).
- ITU (2017). ITU agrees on key 5G performance requirements for IMT-2020. [urlhttp://www.itu.int/en/mediacentre/Pages/2017-PR04.aspx](http://www.itu.int/en/mediacentre/Pages/2017-PR04.aspx).
- Jose, J., Ashikhmin, A., Marzetta, T. L., y Vishwanath, S. (2011). Pilot contamination and precoding in multi-cell tdd systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 10(8):2640–2651.
- Jungnickel, V., Manolakis, K., Zirwas, W., Panzner, B., Braun, V., Lossow, M., Sternad, M., Apelfrojd, R., y Svensson, T. (2014). The role of small cells, coordinated multipoint, and massive mimo in 5g. *IEEE Communications Magazine*, 52(5):44–51.
- Kapetanovic, D., Zheng, G., y Rusek, F. (2015). Physical layer security for massive mimo: An overview on passive eavesdropping and active attacks. *IEEE Communications Magazine*, 53(6):21–27.
- Karjalainen, J., Nekovee, M., Benn, H., Kim, W., Park, J., y Sungsoo, H. (2014). Challenges and opportunities of mm-wave communication in 5g networks. En *Cognitive Radio oriented Wireless networks and communications (CROWNCOM), 2014 9th International Conference on*, pp. 372–376. IEEE.
- Kay, S. M. (1993). *Fundamentals of statistical signal processing*. Prentice Hall PTR.
- Kim, Y., Ji, H., Lee, H., Lee, J., Ng, B. L., y Zhang, J. (2013). Evolution beyond lte-advanced with full dimension mimo. En *Communications Workshops (ICC), 2013 IEEE International Conference on*, pp. 111–115. IEEE.
- Kim, Y., Ji, H., Lee, J., Nam, Y.-H., Ng, B. L., Tzanidis, I., Li, Y., y Zhang, J. (2014). Full dimension mimo (fd-mimo): The next evolution of mimo in lte systems. *IEEE Wireless Communications*, 21(2):26–33.
- Kumar, A., Chandrasekaran, S., Chockalingam, A., y Rajan, B. S. (2011). Near-optimal large-mimo detection using randomized mcmc and randomized search algorithms. En *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 1–5. IEEE.

- Larsson, E. G., Edfors, O., Tufvesson, F., y Marzetta, T. L. (2014). Massive mimo for next generation wireless systems. *IEEE Communications Magazine*, 52(2):186–195.
- Lee, J. y Kwak, Y. (2016). 5g standard development: Technology and roadmap. *Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementations*, pp. 561–576.
- Li, P. y Murch, R. D. (2010). Multiple output selection-las algorithm in large mimo systems. *IEEE Communications Letters*, 14(5).
- Liu, T.-h. y Liu, Y.-L. Y. (2008). Modified fast recursive algorithm for efficient mmse-sic detection of the v-blast system. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(10).
- Lu, L., Li, G. Y., Swindlehurst, A. L., Ashikhmin, A., y Zhang, R. (2014). An overview of massive mimo: Benefits and challenges. *IEEE journal of selected topics in signal processing*, 8(5):742–758.
- Luther, E. (2014). 5g massive mimo testbed: From theory to reality. *white paper, available online: <https://studylib.net/doc/18730180/5g-massive-mimo-testbed-from-theory-to-reality>*.
- Maciel Barboza, F. M., Sanchez Garcia, J., Soriano Equigua, L., Castillo Soria, F. R., y Flores Troncoso, J. (2015). User Scheduling Algorithms in Multiuser Massive MIMO Systems Towards 5G. [urlhttp://ieeexplore.ieee.org/document/7404908/](http://ieeexplore.ieee.org/document/7404908/).
- Marčenko, V. A. y Pastur, L. A. (1967). Distribution of eigenvalues for some sets of random matrices. *Mathematics of the USSR-Sbornik*, 1(4):457.
- Marzetta, T. L. (2010). Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9(11):3590–3600.
- Marzetta, T. L. (2015). Massive mimo: an introduction. *Bell Labs Technical Journal*, 20:11–22.
- Marzetta, T. L. y Ashikhmin, A. (2010). Beyond lte: Hundreds of base station antennas. En *Proc. IEEE Commun. Theory Workshop*.

- MathWorks (2017). Matlab parallel computing toolbox. [urlhttps://www.mathworks.com/products/parallel-computing.html](https://www.mathworks.com/products/parallel-computing.html).
- Mehmood, Y., Afzal, W., Ahmad, F., Younas, U., Rashid, I., y Mehmood, I. (2013a). Large scaled multi-user mimo system so called massive mimo systems for future wireless communication networks. En *Automation and Computing (ICAC), 2013 19th International Conference on*, pp. 1–4. IEEE.
- Mehmood, Y., Haider, N., Afzal, W., Younas, U., Rashid, I., e Imran, M. (2013b). Impact of massive mimo systems on future m2m communication. En *Communications (MICC), 2013 IEEE Malaysia International Conference on*, pp. 534–537. IEEE.
- Melian, B. B. y Fred, G. (2003). Introduccion a la busqueda tabu. *University of Colorado at Boulder*, p. 4.
- Moshavi, S., Kanterakis, E. G., y Schilling, D. L. (1996). Multistage linear receivers for ds-cdma systems. *International journal of wireless information networks*, 3(1):1–17.
- Nam, Y.-H., Ng, B. L., Sayana, K., Li, Y., Zhang, J., Kim, Y., y Lee, J. (2013). Full-dimension mimo (fd-mimo) for next generation cellular technology. *IEEE Communications Magazine*, 51(6):172–179.
- Nam, Y.-H., Rahman, M. S., Li, Y., Xu, G., Onggosanusi, E., Zhang, J., y Seol, J.-Y. (2015). Full dimension mimo for lte-advanced and 5g. En *Information Theory and Applications Workshop (ITA), 2015*, pp. 143–148. IEEE.
- Nasir, S. A., Mustaqim, M., y Khawaja, B. A. (2014). Antenna array for 5 th generation 802.11 ac wi-fi applications. En *High-capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies (HONET), 2014 11th Annual*, pp. 20–24. IEEE.
- Ngo, H. Q., Larsson, E. G., y Marzetta, T. L. (2013). Energy and spectral efficiency of very large multiuser mimo systems. *IEEE Transactions on Communications*, 61(4):1436–1449.
- Osseiran, A. (2013). The 5g mobile and wireless communications system. *METIS2020*.
- Osseiran, A., Monserrat, J. F., y Marsch, P. (2016). *5G Mobile and Wireless Communications Technology*. Cambridge University Press.

- Paulraj, A. J. y Kailath, T. (1994). Increasing capacity in wireless broadcast systems using distributed transmission/directional reception (dtdr). US Patent 5,345,599.
- Qualcomm (2016). Progress on LAA and its relationship to LTE-U and MulteFire. [urlhttps://www.qualcomm.com/media/documents/files/laa-webinar-feb-2016.pdf](https://www.qualcomm.com/media/documents/files/laa-webinar-feb-2016.pdf).
- Qualcomm (2017a). 3gpp agrees on plan to accelerate 5g NR - the global 5g standard - for 2019 deployments | Qualcomm. [urlhttps://www.qualcomm.com/news/onq/2017/03/09/3gpp-agrees-plan-accelerate-5g-nr-global-5g-standard-2019-deployments](https://www.qualcomm.com/news/onq/2017/03/09/3gpp-agrees-plan-accelerate-5g-nr-global-5g-standard-2019-deployments).
- Qualcomm (2017b). 3gpp starts study on 5g NR spectrum sharing. [urlhttps://www.qualcomm.com/news/onq/2017/04/26/3gpp-starts-study-5g-nr-spectrum-sharing](https://www.qualcomm.com/news/onq/2017/04/26/3gpp-starts-study-5g-nr-spectrum-sharing).
- Ramiro, C., Vidal, A. M., y Gonzalez, A. (2015). Mimopack: a high-performance computing library for mimo communication systems. *The Journal of Supercomputing*, 71(2):751–760.
- Rappaport, T. S., Heath Jr, R. W., Daniels, R. C., y Murdock, J. N. (2014). *Millimeter wave wireless communications*. Pearson Education.
- Rappaport, T. S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., Wong, G. N., Schulz, J. K., Samimi, M., y Gutierrez, F. (2013). Millimeter wave mobile communications for 5g cellular: It will work! *IEEE access*, 1:335–349.
- Roh, W., Seol, J.-Y., Park, J., Lee, B., Lee, J., Kim, Y., Cho, J., Cheun, K., y Aryanfar, F. (2014a). Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results. [url http://ieeexplore.ieee.org/document/6736750/](http://ieeexplore.ieee.org/document/6736750/).
- Roh, W., Seol, J.-Y., Park, J., Lee, B., Lee, J., Kim, Y., Cho, J., Cheun, K., y Aryanfar, F. (2014b). Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5g cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results. *IEEE communications magazine*, 52(2):106–113.
- Rusek, F., Persson, D., Lau, B. K., Larsson, E. G., Marzetta, T. L., Edfors, O., y Tufveson, F. (2013). Scaling up mimo: Opportunities and challenges with very large arrays. *IEEE Signal Processing Magazine*, 30(1):40–60.

- Santos Velázquez, I. (2014). Revisión de algoritmos de detección para sistemas mimo de alto orden. *Tratamiento de Señal y Comunicaciones* (pp. 122).
- SearchDataCenter (2017). El nuevo espectro para 5g estudian 11 nuevas bandas. [urlhttp://searchdatacenter.techtarget.com/es/cronica/El-nuevo-espectro-para-5G-Se-estudian-11-nuevas-bandas](http://searchdatacenter.techtarget.com/es/cronica/El-nuevo-espectro-para-5G-Se-estudian-11-nuevas-bandas).
- Shen, J.-C., Zhang, J., y Letaief, K. B. (2015). Downlink user capacity of massive mimo under pilot contamination. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(6):3183–3193.
- Shepard, C., Yu, H., y Zhong, L. (2013). Argosv2: A flexible many-antenna research platform. En *Proceedings of the 19th annual international conference on Mobile computing & networking*, pp. 163–166. ACM.
- Sraga, M., Momcilovic, N., y Tekovic, A. (2014). Mobile data wi-fi offloading. En *Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 2014 37th International Convention on*, pp. 1648–1649. IEEE.
- Suthisopapan, P., Kasai, K., Imtawil, V., y Meesomboon, A. (2012). Approaching capacity of large mimo systems by non-binary ldpc codes and mmse detection. En *Information Theory Proceedings (ISIT), 2012 IEEE International Symposium on*, pp. 1712–1716. IEEE.
- Svac, P., Meyer, F., Riegler, E., y Hlawatsch, F. (2012). Low-complexity detection for large mimo systems using partial ml detection and genetic programming. En *Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2012 IEEE 13th International Workshop on*, pp. 585–589. IEEE.
- Švač, P., Meyer, F., Riegler, E., y Hlawatsch, F. (2013). Soft-heuristic detectors for large mimo systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 61(18):4573–4586.
- Swindlehurst, A. L., Ayanoglu, E., Heydari, P., y Capolino, F. (2014). Millimeter-wave massive mimo: The next wireless revolution? *IEEE Communications Magazine*, 52(9):56–62.
- Talbot, D. (2014). A 96-Antenna System Tests the Next Generation of Wireless. [urlhttps://www.technologyreview.com/s/523686/a-96-antenna-system-tests-the-next-generation-of-wireless/](https://www.technologyreview.com/s/523686/a-96-antenna-system-tests-the-next-generation-of-wireless/).

- Talwar, S., Choudhury, D., Dimou, K., Aryafar, E., Bangerter, B., y Stewart, K. (2014). Enabling technologies and architectures for 5g wireless. En *Microwave Symposium (IMS), 2014 IEEE MTT-S International*, pp. 1–4. IEEE.
- Telatar, E. (1999). Capacity of multi-antenna gaussian channels. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 10(6):585–595.
- Tse, D. y Viswanath, P. (2005). *Fundamentals of wireless communication*. Cambridge university press.
- Ülgen, O., Black, J. J., Johnsonbaugh, B., y Klunge, R. (2006). Simulation methodology: A practitioner's perspective. *Dearborn, MI: University of Michigan*.
- Vieira, J., Malkowsky, S., Nieman, K., Miers, Z., Kundargi, N., Liu, L., Wong, I., Öwall, V., Edfors, O., y Tufvesson, F. (2014). A flexible 100-antenna testbed for massive mimo. En *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2014*, pp. 287–293. IEEE.
- Wang, C.-X., Haider, F., Gao, X., You, X.-H., Yang, Y., Yuan, D., Aggoune, H., Haas, H., Fletcher, S., y Hepsaydir, E. (2014). Cellular architecture and key technologies for 5g wireless communication networks. *IEEE Communications Magazine*, 52(2):122–130.
- Wolniansky, P. W., Foschini, G. J., Golden, G., y Valenzuela, R. A. (1998). V-blast: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel. En *Signals, Systems, and Electronics, 1998. ISSSE 98. 1998 URSI International Symposium on*, pp. 295–300. IEEE.
- Wong, V. W., Schober, R., Ng, D. W. K., y Wang, L.-C. (2017). *Key Technologies for 5G Wireless Systems*. Cambridge university press.
- Xu, G., Li, Y., Nam, Y.-H., Zhang, C., Kim, T., y Seol, J.-Y. (2014). Full-dimension mimo: Status and challenges in design and implementation. En *2014 IEEE Communication Theory Workshop (CTW)*.
- Yan, X., Yin, H., Xia, M., y Wei, G. (2015). Pilot sequences allocation in tdd massive mimo systems. En *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2015 IEEE*, pp. 1488–1493. IEEE.
- Yang, S. y Hanzo, L. (2015). Fifty years of mimo detection: The road to large-scale mimos. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4):1941–1988.

- Zhang, J., Ge, X., Li, Q., Guizani, M., y Zhang, Y. (2017). 5g millimeter-wave antenna array: Design and challenges. *IEEE Wireless Communications*, 24(2):106–112.
- Zhang, Z., Chai, X., Long, K., Vasilakos, A. V., y Hanzo, L. (2015). Full duplex techniques for 5G networks: self-interference cancellation, protocol design, and relay selection. [urlhttp://ieeexplore.ieee.org/document/7105651/](http://ieeexplore.ieee.org/document/7105651/).
- Zhou, Q. y Ma, X. (2012). An improved Ir-aided k-best algorithm for mimo detection. En *Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), 2012 International Conference on*, pp. 1–5. IEEE.
- Zhou, Q. y Ma, X. (2013). Element-based lattice reduction algorithms for large mimo detection. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 31(2):274–286.
- Zhu, J., Schober, R., y Bhargava, V. K. (2014). Secure transmission in multicell massive mimo systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13(9):4766–4781.
- Zhu, X., Wang, Z., Dai, L., y Qian, C. (2015). Smart pilot assignment for massive mimo. *IEEE Communications Letters*, 19(9):1644–1647.

Anexo A

Codigos en MATLAB de los Esquemas de Detección Propuestos

En este Anexo se presentan los códigos de las funciones que se agregaron al Ambiente de Simulación referido como *Detection MIMO Toolbox* con el que se soportaron los trabajos de (Cespedes *et al.*, 2014) (Santos Velázquez, 2014).

La figura A.1 presenta el código de MMSE-TS y La figura A.2 presenta el código de ZF-TS.

Las dos funciones teniendo establecido la solución del correspondiente detector lineal (Zf o MMSE), la cantidad de Iteraciones (*M_itera*) y el tamaño T de la lista tabú (*tabu_list_max_lenght*) invocan la función TS que se presenta en la figura A.3

Esta función a su vez recurre a la función *get_best_in_negh* de la figura A.4 y a las funciones *add_last2* y *free_first* de la figura A.5

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function SER=MMSE_TS(L,n_symbols,N,M,SNRdB,x_all,n_all,H_all)
% Alphabet
A=-(L-1):2:(L-1);
energy= (L*L-1)/3; % PAM energy
n_errors_TS=zeros(length(SNRdB),1); % number of errors get for each SNR
H=H_all; % normal random matrix with zero mean and unit variance
for ind_db=1:1:length(SNRdB)
    sigma=sqrt(N*energy*10^(-SNRdB(ind_db)/10));
    error=0;
    parfor loop2=1:n_symbols
        x=x_all(:,loop2);
        n=n_all(:,loop2);
        % apply noisy linear
        y=H*x+sigma*n;
        z=inv(H'*H+(sigma^2/energy)*eye(N))*H'*y;
        % Decoder
        belief_x=zeros(N,L);
        a2=A;
        for i=1:L
            belief_x(:,i)=abs(z(:)-a2(i));
        end
        [min_belief,ind]=min(belief_x,[],2);
        x_decod_MMSE=A(ind)';%
        %%%%%%%%% include TABU SEARCH
        M_itera=30; tabu_list_max_length=60;
        x_decod_MMSE_TS=TS(A,H,y,x_decod_MMSE,M_itera,tabu_list_max_length);
        %%
        error=error+sum(x~=x_decod_MMSE_TS);
    end
    n_errors_TS(ind_db)=error;
end
SER=n_errors_TS/(N*n_symbols);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Figura A.1. Código de la Función MMSE-TS

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function SER=ZF_TS(L,n_symbols,N,M,SNRdB,x_all,n_all,H_all)
    % Alphabet
    A=-(L-1):2:(L-1);
    energy= (L*L-1)/3; % PAM energy
    n_errors_TS=zeros(length(SNRdB),1); % number of errors get for each SNR
    H=H_all; % normal random matrix with zero mean and unit variance
    for ind_db=1:1:length(SNRdB)
        sigma=sqrt(N*energy*10^(-SNRdB(ind_db)/10));
        error=0;
        parfor loop2=1:n_symbols
            x=x_all(:,loop2);
            n=n_all(:,loop2);
            % apply noisy linear
            y=H*x+sigma*n;
            z=pinv(H)*y;
            % Decoder
            belief_x=zeros(N,L);
            a2=A;
            for i=1:L
                belief_x(:,i)=abs(z(:)-a2(i));
            end
            [min_belief,ind]=min(belief_x,[],2);
            x_decod_ZF=A(ind)';%
            %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% include TABU SEARCH
            M_itera=40; tabu_list_max_length=60;
            x_decod_TS=TS(A,H,y,x_decod_ZF,M_itera,tabu_list_max_length);
            %%
            error=error+sum(x~=x_decod_TS);
        end
        n_errors_TS(ind_db)=error;
    end
    SER=n_errors_TS/(N*n_symbols);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Figura A.2. Código de la Función ZF-TS

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
function x_decod_fin=TS(A,H,y,x,M_itera,tabu_list_max_length)  
global tabu_list shat_new;  
shat=x; %%initial solution  
shat_save=shat;  
dmin=norm((y-H*shat),2);  
tabu_list=shat;  
for idx=1:1:M_itera  
    dmin_new=get_best_in_neigh(A,H,y,shat);  
    if(dmin_new<dmin)  
        shat_save=shat_new;  
        dmin=dmin_new;  
    end  
    shat=shat_new;  
    add_last2(shat_new);  
    [numfila, numcol]=size(tabu_list);  
    if(numcol>=tabu_list_max_length)  
        free_first(tabu_list);  
    end  
end  
x_decod_fin=shat_save;  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Figura A.3. Código de la Función TS

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function d_min_new=get_best_in_neigh(A,H,y,shat)
global tabu_list shat_new;
[xx2, Nt]=size(H);
[xx4, L]=size(A);
opti=zeros(Nt, (L-1));
for i=1:1:Nt
    t=0;
    for j=1:1:L
        te=shat(i)-A(j);
        if te~=0
            t=t+1;
            opti(i,t)=A(j);
        end
    end
end
neigh=zeros(Nt, (L-1)*Nt);
xx=1;
for idx=1:1:Nt
    al=shat;
    for j=1:1:L-1
        al(idx)=opti(idx,j);
        neigh(:,xx)=al;
        xx=xx+1;
    end
end
end
%%
neigh_new=zeros(0,0);
neigh_empty_flag=1;
%%
xx=(L-1)*Nt;
while(neigh_empty_flag==1)
    %%%
    [NNT2, tabu_list_length]=size(tabu_list);
    for idx=1:1:xx
        tabu_flag=0;
        for idx2=1:1:tabu_list_length
            temp2=norm((neigh(:,idx)-tabu_list(:,idx2)),2);
            if temp2<0.1
                tabu_flag=1;
            end
        end
        if tabu_flag==0
            neigh_new=[neigh_new,neigh(:,idx)];
        end
    end
    [NNT3, Nt3]=size(neigh_new);
    if Nt3==0
        free_first(tabu_list);
    else
        neigh_empty_flag=0;
    end
end
end
[NNT3, neigh_length]=size(neigh_new);
dmin2=norm((y-H*neigh_new(:,1)),2);
idx_min=1;
for idx=2:1:neigh_length
    d_temp=norm((y-H*neigh_new(:,idx)),2); %%%ML metric
    if d_temp<dmin2
        dmin2=d_temp;
        idx_min=idx;
    end
end
end
%%
shat_new=neigh_new(:,idx_min);
d_min_new=dmin2;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Figura A.4. Función que trabaja sobre el Vecindario de la solución ZF o MMSE

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
  
function add_last2(a)  
    global tabu_list;  
    tabu_temp=tabu_list;  
    tabu_temp=[tabu_temp,a]; %  
    tabu_list=tabu_temp;  
  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
  
function free_first(tabu_list1)  
    [NNT4, num_col_tabu_list]=size(tabu_list1);  
    matriz_temp=[];  
    for posi=1:1:num_col_tabu_list-1  
        matriz_temp(:,posi)=tabu_list1(:,posi+1);  
    end  
    global tabu_list  
    tabu_list=matriz_temp;  
  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Figura A.5. Funciones Complementarias

Anexo B

Resultados Adicionales

En este Anexo se relacionan los resultados que se obtuvieron para cuatro órdenes de MIMO desde 8x8 hasta 64x64 y para dos niveles de QAM: 4-QAM y 16-QAM.

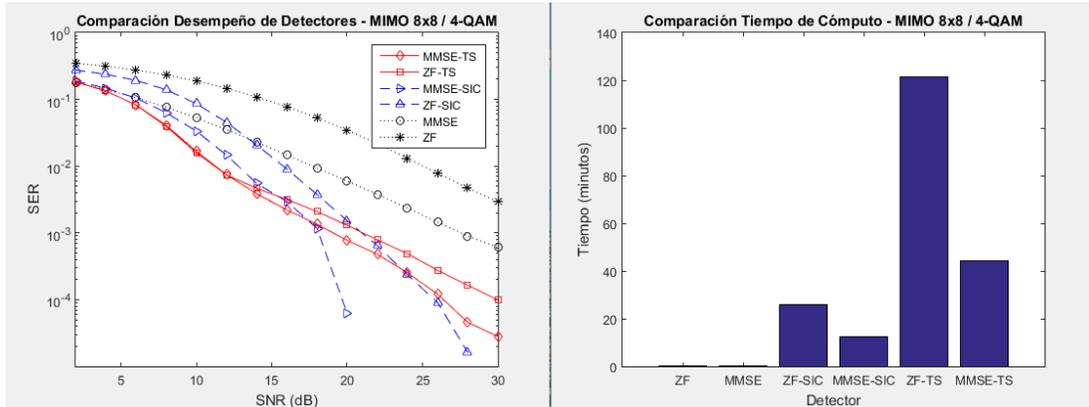


Figura B.1. Resultados MIMO 8 x 8 - 4QAM

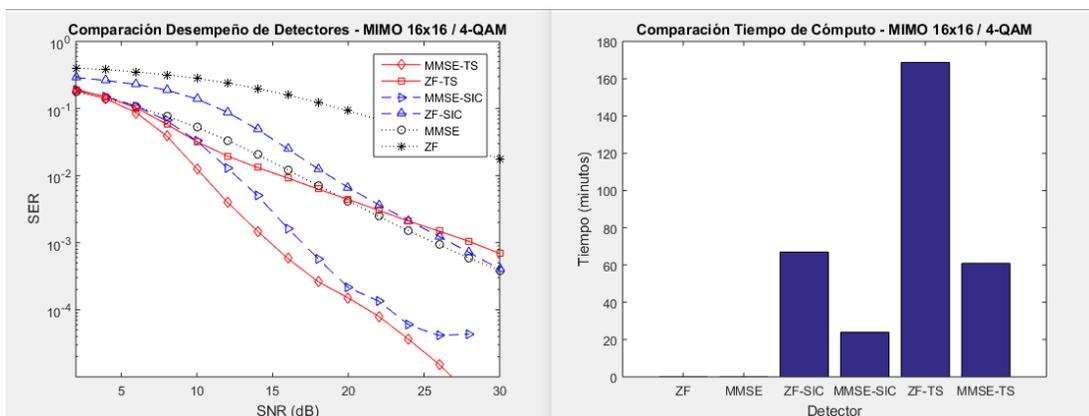


Figura B.2. Resultados MIMO 16 x 16 - 4QAM

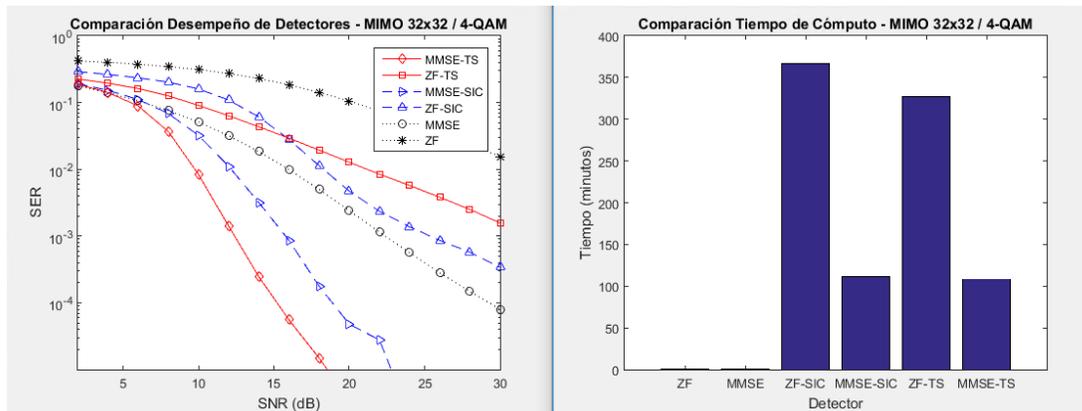


Figura B.3. Resultados MIMO 32 x 32 - 4QAM

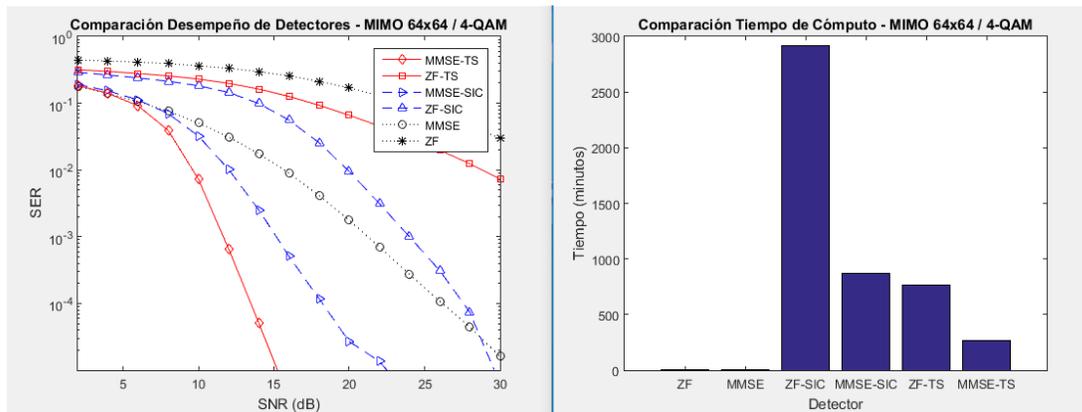


Figura B.4. Resultados MIMO 64 x 64 - 4QAM

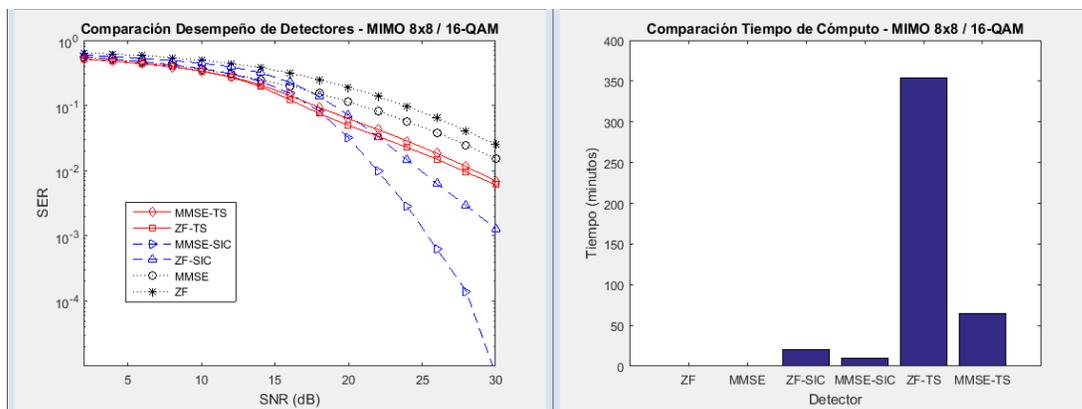


Figura B.5. Resultados MIMO 8 x 8 - 16QAM

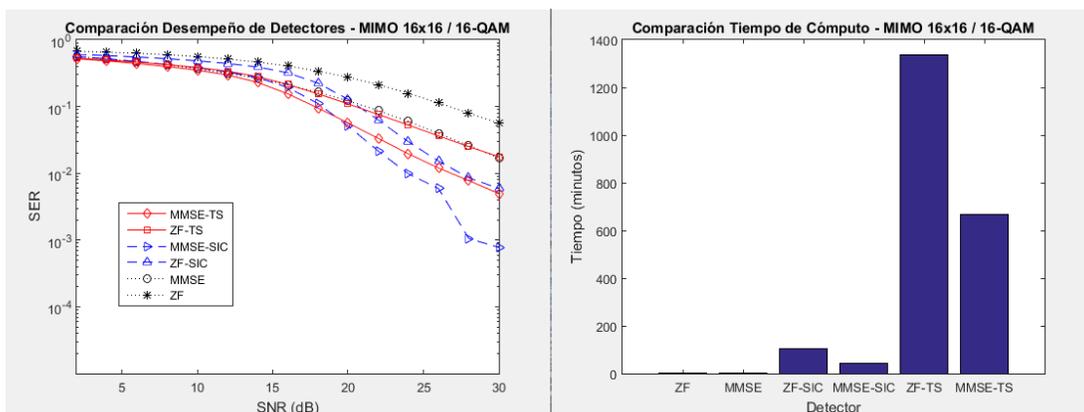


Figura B.6. Resultados MIMO 16 x 16 -16QAM

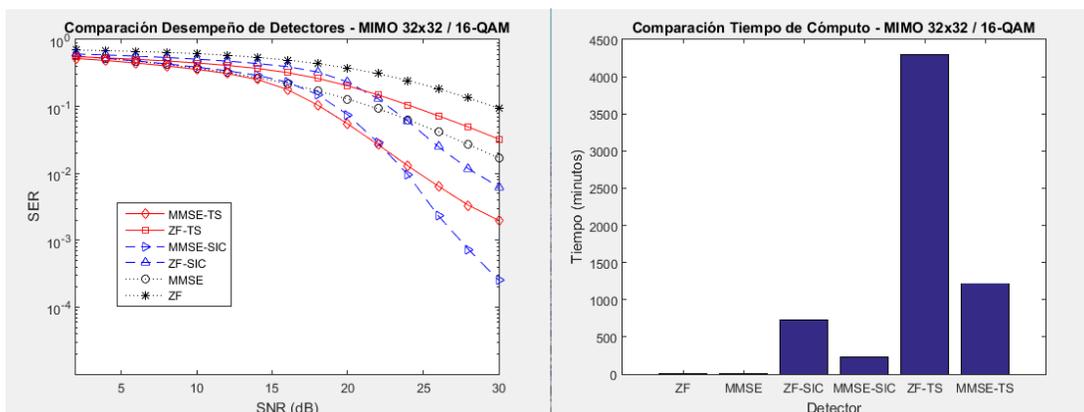


Figura B.7. Resultados MIMO 32 x 32 -16QAM

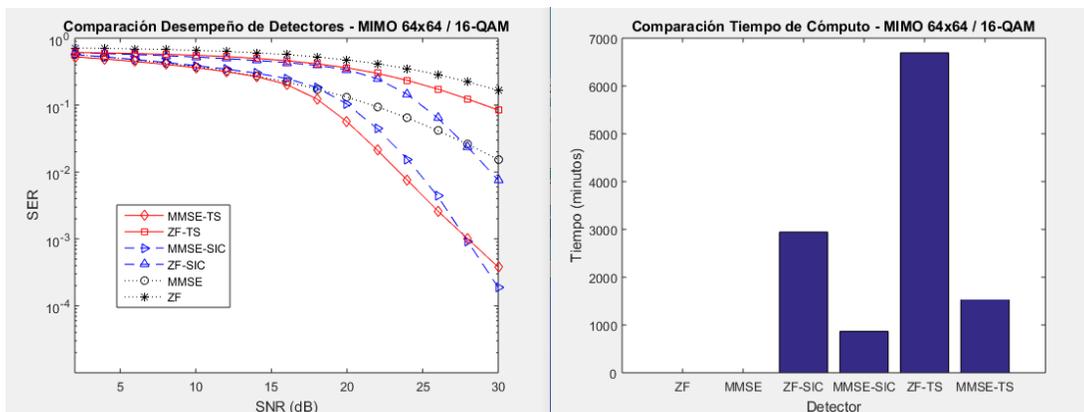


Figura B.8. Resultados MIMO 64 x 64 -16QAM

Anexo C

Metodología de Simulación

En este Anexo se presenta la metodología de simulación de (Ülgen *et al.*, 2006) que se tuvo como referente para el desarrollo de este trabajo, haciendo una adaptación de la misma, de tal forma que se tomaron elementos que aplican y que sirvieron para al propósito general que llevó a la obtención de los resultados. En las secciones de los capítulos 5 y 6 se encuentran los logros que se obtenían con el cumplimiento de cada fase. La figura C.1 ilustra las fases que se describen a continuación:

- Definición del problema: comprende la definición de los objetivos del estudio, la descripción y delimitación del problema, el nivel de detalle y abstracción del modelo y la estimación de los recursos necesarios para el estudio.
- Diseño del estudio: se listan los supuestos, se estiman los modelos necesarios, se seleccionan las herramientas necesarias para llevar a cabo el estudio y el nivel de detalle de los datos relacionados con el estudio.
- Diseño del modelo conceptual: se establece la codificación del modelo (continua, discreta o combinada), se determina los elementos que componen el sistema y la evaluación del desempeño.
- Especificación de los elementos del modelo conceptual: se especifican las funciones y características de cada bloque que constituye el modelo conceptual.
- Construcción, verificación y validación del modelo de simulación: consiste en el diseño, implementación y validación de los códigos computacionales que permitan llevar a cabo los escenarios de simulación propuestos.

- Experimentación con el modelo de simulación: se realizan las pruebas sobre los escenarios seleccionando recolectando información pertinente para analizar el desempeño del sistema.
- Análisis de los resultados: se estudian de forma estadística los datos recolectados en las pruebas de simulación con el fin de inferir sobre el comportamiento del sistema.

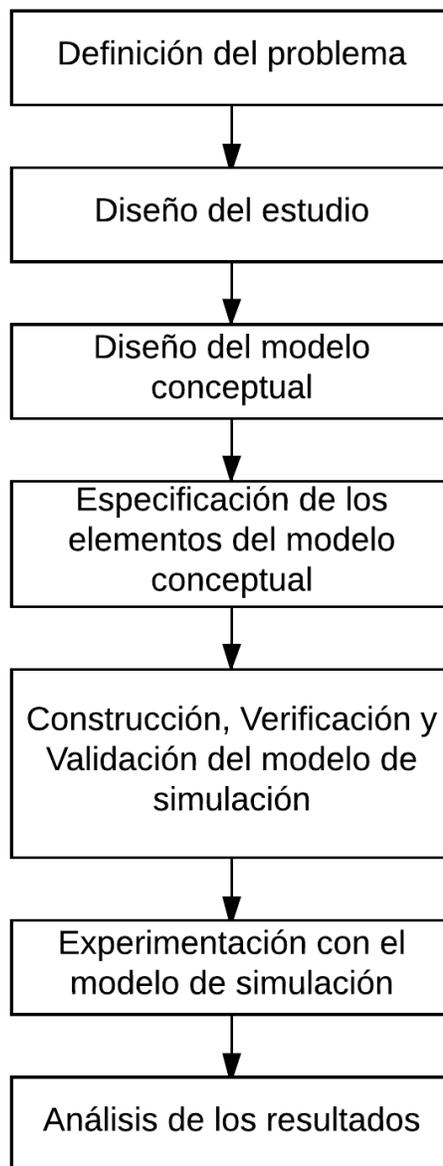


Figura C.1. Fases de la Metodología de Simulación de Referencia