



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA-TELECOMUNICACIONES

**“DISEÑO Y EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE CALENDARIZACIÓN  
APLICADOS A LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTE”**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
AMADO GUTIÉRREZ GÓMEZ

TUTOR PRINCIPAL  
DR. VÍCTOR RANGEL LICEA, TELECOMUNICACIONES, UNAM  
COMITÉ TUTOR  
DR. JAVIER GÓMEZ CASTELLANOS, TELECOMUNICACIONES, UNAM  
DR. JOSÉ MARÍA MATÍAS MARURI, TELECOMUNICACIONES UNAM  
DR. GERARDO A. LAGUNA SÁNCHEZ, TELECOMUNICACIONES UAM LERMA  
DR. DAVID H. COVARRUBIAS ROSALES, TELECOMUNICACIONES CICESE

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, MARZO 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. JOSÉ MARÍA MATÍAS MARURI

Secretario: DR. JAVIER GÓMEZ CASTELLANOS

1er. Vocal: DR. VÍCTOR RANGEL LICEA

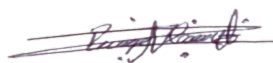
2do. Vocal: DR. GERARDO ABEL LAGUNA SÁNCHEZ

3er. Vocal: DR. DAVID HILARIO COVARRUBIAS ROSALES

Esta disertación fue realizada en el anexo de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

## **TUTOR DE TESIS:**

DR. VÍCTOR RANGEL LICEA



---

**FIRMA**

# Dedicatoria

A mi esposa, por su tiempo y amor que me ha brindado durante mis estudios de Doctorado. Tu apoyo incondicional y tus consejos han sido un factor importante para concluir esta gran experiencia en el campo de la investigación científica. TE AMO.

A mi hijo, por ser siempre mi mayor motivación e inspiración para seguir creciendo como persona y como profesionalista.

A Dios, por mi salud y por la salud de mi familia.

A mis padres y a mi hermana, que me han apoyado incondicionalmente durante la realización de mis estudios del Doctorado.

# Agradecimientos

Agradezco al Dr. Víctor Rangel Licea, quien me ha guiado durante este duro camino de la Investigación. También, agradezco su apoyo incondicional y sus enseñanzas, que me han dejado un gran aprendizaje.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme todo lo necesario para llevar a cabo mis estudios de Doctorado.

Agradezco al Dr. Gerardo Abel Laguna Sánchez por los consejos que me brindó al comienzo de mis estudios del Doctorado.

Agradezco a mi Comité Doctoral, el Dr. Javier Gómez Castellanos, Dr. José María Matías Maruri y Dr. Gerardo Abel Laguna Sánchez, por su tiempo y por todas las recomendaciones realizadas a mi trabajo de investigación durante 8 semestres.

Agradezco al Dr. David Covarrubias Rosales por su apoyo y consejos para publicar el artículo relacionado con mi trabajo de investigación del Doctorado, requisito para poder obtener el grado a Doctor.

Agradezco a todo el pueblo de México, quienes con sus impuestos fue posible que el Gobierno de México a través de CONACYT y COMECYT, me otorgaran una Beca para mis estudios de Doctorado.

Agradecimiento a los proyectos (PAPIIT y EWIN) por el apoyo recibido para la realización del trabajo de investigación y la publicación del artículo principal:

- Proyecto PAPIIT IN116316, “Diseño y evaluación de técnicas de calendarización aplicadas a los Sistemas de Transportes Inteligentes”.
- Proyecto EWIN Ref EP/P029221/1-1-J15413/14/15. Número de registro UNAM: 49547-2363-12-IX-17. Red de información del agua para predicción de inundación en tiempo real basada en redes de telefonía móvil y WiFi.

# Índice general

Índice de figuras	v
Índice de tablas	viii
Acrónimos	x
Resumen	1
Abstract	3
<b>1. Introducción</b>	<b>5</b>
1.1. Requerimientos de LTE en redes vehiculares . . . . .	7
1.1.1. Seguridad . . . . .	7
1.1.2. Eficiencia de tráfico . . . . .	8
1.1.3. Comodidad y entretenimiento . . . . .	9
1.2. Justificación . . . . .	10
1.3. Planteamiento del problema . . . . .	14
1.4. Hipótesis . . . . .	15
1.5. Objetivos del trabajo de investigación . . . . .	16
1.5.1. Objetivo general . . . . .	16
1.5.2. Objetivos específicos . . . . .	16
1.6. Metodología de la investigación . . . . .	17
1.7. Contribución . . . . .	18
1.8. Estructura del documento . . . . .	19

<b>2. Marco de referencia</b>	<b>20</b>
2.1. Introducción . . . . .	20
2.2. Tecnología LTE . . . . .	22
2.2.1. Estructura del <i>Frame</i> . . . . .	22
2.2.2. Esquemas de acceso múltiple . . . . .	26
2.2.3. Asignación de recursos a nivel de suportadora . . . . .	30
2.2.4. Asignación de recursos a nivel de grupo de subportadoras . . . . .	32
2.2.5. Modelado de la asignación de subportadoras en SC-FDMA . . . . .	32
2.2.6. Modelado de la asignación de subportadoras en OFDMA . . . . .	34
2.2.7. Evaluación de asignación de grupo de subportadoras en SCFDMA y OFDMA . . . . .	35
2.2.8. Bloque de recurso (RB) . . . . .	39
2.3. Algoritmos de calendarización de enlace de subida . . . . .	41
2.3.1. Calendarización de paquetes (PS) . . . . .	41
2.3.2. Predicción de canal para adaptar el enlace . . . . .	43
2.3.3. Adaptación de enlace mediante el procesamiento de las SRS . . . . .	45
2.3.4. Generación de la matriz de estado del canal . . . . .	48
<b>3. Estado del arte</b>	<b>53</b>
3.1. Introducción . . . . .	53
3.2. Algoritmos de asignación de recursos del enlace de subida de LTE . . . . .	55
3.2.1. Literatura especializada . . . . .	55
3.2.2. Tabla comparativa de la literatura revisada . . . . .	75
3.3. Simuladores LTE . . . . .	76
3.3.1. Literatura especializada . . . . .	76
3.4. Simulador de LTE a nivel de enlace para enlace de subida . . . . .	81
3.4.1. Señales de referencia . . . . .	81
3.4.2. Adaptación de enlace . . . . .	84
3.4.3. Canal PUSCH, datos de usuario . . . . .	85
<b>4. Diseño de algoritmos para un entorno V2I</b>	<b>87</b>
4.1. Introducción . . . . .	87

4.2. Validación del simulador de LTE . . . . .	88
4.2.1. Rendimiento teórico . . . . .	89
4.2.2. Análisis del rendimiento teórico . . . . .	90
4.2.3. Análisis del rendimiento simulado . . . . .	91
4.3. Diseño del algoritmo de asignación de recursos . . . . .	94
4.4. Puntos a considerar en el diseño del algoritmo . . . . .	95
4.5. Algoritmo RME . . . . .	98
4.5.1. Diagrama de flujo de RME . . . . .	99
4.5.2. Ejecución del algoritmo RME sobre la matriz de métricas . . . . .	99
4.6. Análisis teórico de la adaptación de enlace clásico . . . . .	102
4.6.1. Análisis de la adaptación de enlace clásico en el simulador LTE . . . . .	107
4.6.2. Conclusiones referente a la adaptación de enlace clásico . . . . .	114
4.7. Análisis teórico de adaptación de enlace mejorado . . . . .	115
4.8. Variantes de la asignación de MCS mediante CQI . . . . .	120
4.9. Análisis de la adaptación de enlace mejorado en el simulador LTE . . . . .	121
<b>5. Evaluación de desempeño</b>	<b>126</b>
5.1. Introducción . . . . .	126
5.2. Evaluación de desempeño a 80 km/h . . . . .	127
5.2.1. Parámetros de simulación . . . . .	127
5.2.2. Métricas de evaluación . . . . .	128
5.2.3. Definición de los algoritmos a evaluar . . . . .	130
5.2.4. Resultados del desempeño obtenidos . . . . .	131
5.3. Evaluación de desempeño a 350 km/h . . . . .	142
5.4. Evaluación de desempeño bajo dos diferentes velocidades, 80 km/h y 350 km/h	151
<b>Conclusiones</b>	<b>156</b>
<b>Verificación de la hipótesis</b>	<b>158</b>
<b>Trabajo futuro</b>	<b>161</b>
<b>Trabajo de investigación publicado</b>	<b>162</b>





# Índice de figuras

1.1. Transmisión de mensajes CAM en un entorno vehicular a través de LTE [7].	11
1.2. Transmisión de mensajes DENM en un entorno vehicular a través de LTE [5].	13
2.1. Estructura de radio frame tipo 1: FDD. . . . .	23
2.2. Estructura de radio frame tipo 2: TDD. . . . .	24
2.3. OFDMA. . . . .	27
2.4. SC-FDMA. . . . .	29
2.5. Mapeo de subportadoras. . . . .	30
2.6. OFDMA comparado con SC-FDMA-D-I y SC-FDMA-L . . . . .	31
2.7. Comparación entre OFDMA-64QAM y SC-FDMA-64QAM, para los tipos localizado y distribuido. . . . .	35
2.8. Comparación entre OFDMA-16QAM y SC-FDMA-16QAM, para los tipos localizado y distribuido. . . . .	36
2.9. Comparación entre OFDMA-QPSK y SC-FDMA-QPSK, para los tipos localizado y distribuido. . . . .	37
2.10. Esquema del transmisor y receptor de SC-FDMA y OFDMA. . . . .	38
2.11. Bloque de recurso. . . . .	39
2.12. Red de recursos. . . . .	40
2.13. Módulos de la calendarización en el dominio del tiempo y de la frecuencia. . . . .	41
2.14. Proceso de envío de SRS y adaptación del enlace. . . . .	44
2.15. Módulos de capa física del módulo RRM [27]. . . . .	46
2.16. Medición de la calidad de canal por subportadora en el TTI de un usuario. . . . .	48
2.17. Obtención de los RB de un UE. . . . .	51
2.18. Matriz de estado del canal para $l$ -usuarios. . . . .	51

3.1. Asignación del ancho de banda de transmisión adaptivo. . . . .	61
3.2. CDS regular respecto a el CDS inteligente [46]. . . . .	62
3.3. Empaquetado de los RB. . . . .	69
3.4. <i>Ride peaks</i> [48]. . . . .	70
3.5. Asignación de símbolos de referencias, DMRS y SRS. . . . .	81
3.6. Estimación de los símbolos de referencia, DMRS y SRS [27]. . . . .	82
3.7. Estructura interna del simulador de LTE a nivel de enlace[60]. . . . .	83
3.8. Adaptación de enlace en LTE. . . . .	84
3.9. Cadena de procesamiento de señal de LTE del enlace de subida [34]. . . . .	85
4.1. Rendimiento teórico de LTE del enlace de subida. . . . .	90
4.2. Rendimiento simulado de LTE del enlace de subida. . . . .	92
4.3. Asignación de señales de referencia en un subframe. . . . .	96
4.4. Diagrama de flujo del algoritmo RME [22]. . . . .	100
5.1. Asignación de recursos a los usuarios con una velocidad de 80 km/h. . . . .	131
5.2. Rendimiento ( <i>Throughput</i> ) con un SNR de 6 dB con una velocidad de 80 km/h. . . . .	133
5.3. Justicia ( <i>Fairness</i> ) bajo un SNR de 6 dB con una velocidad de 80 km/h. . . . .	135
5.4. BLER bajo un SNR de 6 dB con una velocidad de 80 km/h. . . . .	136
5.5. BLER con 50 usuarios a diferentes valores de SNR con un velocidad de 80 km/h. . . . .	139
5.6. Eficiencia espectral con velocidad de 80 km/h. . . . .	141
5.7. Asignación de recursos bajo un SNR de 6 dB a velocidades de 350 km/h. . . . .	142
5.8. Rendimiento ( <i>Throughput</i> ) bajo un SNR de 6 dB a velocidades de 350 km/h. . . . .	143
5.9. Justicia ( <i>Fairness</i> ) bajo un SNR de 6 dB a velocidades de 350 km/h. . . . .	144
5.10. BLER bajo un SNR de 6 dB a velocidades de 350 km/h. . . . .	145
5.11. BLER respecto de el SNR con una velocidad 350 km/h. . . . .	148
5.12. Eficiencia espectral respecto de el número de usuarios con una velocidad de 350 km/h. . . . .	150
5.13. Asignación de recursos bajo un SNR de 6 dB con dos diferentes velocidades de 80 km/h y 350 km/h. . . . .	151
5.14. Rendimiento bajo un SNR de 6 dB con dos diferentes velocidades de 80 km/h y 350 km/h. . . . .	152

5.15. BLER a diferentes valores de SNR y con velocidades de 80 km/h y 350 km/h.	153
5.16. Asignación de recursos a los usuarios con una velocidad de 80 km/h. . . . .	159
5.17. Rendimiento ( <i>Throughput</i> ) con un SNR de 6 dB con una velocidad de 80 km/h.	159
5.18. BLER con 50 usuarios a diferentes valores de SNR con un velocidad de 80 km/h.	160

# Índice de tablas

1.1. Requerimientos de los mensajes CAM [1], [2], [3]. . . . .	7
1.2. Requerimientos de los mensajes DENM [1], [2]. . . . .	8
1.3. Requerimientos de los mensajes de eficiencia de tráfico [1], [3]. . . . .	9
1.4. Requerimientos de entretenimiento [1], [3]. . . . .	10
2.1. Parámetros de evaluación. . . . .	31
2.2. Tabla comparativa de consumo de potencia a nivel de grupo de subportadoras. . . . .	38
2.3. Parámetros de ancho de banda del sistema LTE. . . . .	40
2.4. Mapeo de SINR a CQI [30]. . . . .	47
3.1. Algoritmos de asignación de recursos para SC-FDMA multiusuario [23]. . . . .	57
3.2. Tabla comparativa del estado del arte de los algoritmos de asignación recursos. . . . .	76
3.3. Tabla comparativa de los simuladores de LTE. . . . .	80
4.1. Resultados de rendimiento teórico. . . . .	91
4.2. Parámetros de simulación para el análisis de rendimiento del simulador. . . . .	92
4.3. Comparación entre el rendimiento teórico y simulado. . . . .	93
4.4. Primera iteración, búsqueda del primer máximo. . . . .	101
4.5. Segunda iteración, el UE2 se pone en modo inactivo. . . . .	101
4.6. Tercera iteración, el UE1 se pone en modo inactivo. . . . .	102
4.7. Asignación de RBs a los UEs con respecto al índice de subportadoras. . . . .	103
4.8. Mapeo de SINR a CQI para el enlace de subida de LTE [30]. . . . .	106
4.9. Subportadoras asignadas a cada usuario. . . . .	107
4.10. SINR efectivo y adaptación de enlace del UE1. . . . .	108
4.11. SINR efectivo y adaptación de enlace del UE2. . . . .	109

4.12. SINR efectivo y adaptación de enlace del UE3. . . . .	110
4.13. Información de asignación de recursos a los usuarios. . . . .	111
4.14. Bits de datos asignados a los usuarios. . . . .	113
4.15. Rendimiento de los usuarios con un SNR de 10 dB, y 1 TTI. . . . .	114
4.16. Resultados de post-demodulación. . . . .	115
4.17. SINR efectivo de cada grupo de subportadoras para cada UE. . . . .	121
4.18. Índices de los grupos de subportadoras asignadas a cada usuario. . . . .	121
4.19. Mapeo del grupo de subportadoras a los usuarios. . . . .	122
4.20. Valor mínimo de SNR efectivo. . . . .	122
4.21. Mapeo del CQI-SINR para obtener el MCS de cada usuario. . . . .	123
4.22. Bits de datos asignados a los usuarios con SNR efectivo mínimo. . . . .	124
5.1. Parámetros de simulación. . . . .	128
5.2. Comparación de los resultados de la asignación de recursos con una velocidad de 80 km/h. . . . .	132
5.3. Comparación de los resultados del rendimiento con una velocidad de 80 km/h. . . . .	134
5.4. Comparación de los resultados de la justicia con una velocidad de 80 km/h. . . . .	136
5.5. Comparación de los resultados del BLER con una velocidad de 80 km/h. . . . .	137
5.6. Comparación de los resultados de la tasa de transmisión exitosa con una velocidad de 80 km/h. . . . .	138
5.7. Comparación de los resultados del BLER con una velocidad de 80 km/h a diferentes valores de SNR de 4, 6, 8 y 10 dB. . . . .	140
5.8. Comparación de los resultados de la tasa de transmisión exitosa con una velocidad de 80 km/h a diferentes valores de SNR de 4, 6, 8 y 10 dB. . . . .	140
5.9. Comparación de los resultados del BLER con una velocidad de 350 km/h. . . . .	146
5.10. Comparación de los resultados de la tasa de transmisión exitosa con una velocidad de 350 km/h. . . . .	147
5.11. Comparación de los resultados del BLER con una velocidad de 350 km/h. . . . .	148
5.12. Comparación de los resultados de la tasa de tx. exitosa con vel. de 350 km/h. . . . .	149
5.13. Diferencia entre el rendimiento bajo velocidades de 350 km/h y 80 km/h. . . . .	153
5.14. Incremento y decremento del BLER a velocidades de 80 km/h y 350 km/h. . . . .	155
5.15. Comparación del BLER a velocidades de 80 km/h y 350 km/h. . . . .	155

# Acrónimos

**AWGN** ADDITIVE WHITE GAUSSIAN NOISE

**BLER** BLOCK ERROR RATE

**BMTP** BLOCK ALLOCATION FOR MINIMUM TOTAL POWER

**BSM** BASIC SAFETY MESSAGE

**C-HetVNET** CLUSTER-BASED HETEROGENEOUS VEHICULAR NETWORK

**CAM** COOPERATIVE AWARENESS MESSAGE

**CAN** CONTROLLER AREA NETWORK

**CBS** CHANNEL-BASED SCHEDULING SCHEME

**CCDF** COMPLEMENTARY CUMULATIVE DISTRIBUTION FUNCTION

**CDMA** CODE DIVISION MULTIPLE ACCESS

**CDS** CHANNEL DEPENDENT SCHEDULER

**CH** CLUSTER HEAD

**CM** CLUSTER MEMBER

**CQI** CHANNEL QUALITY INDICATOR

**CRB** CHUNKED RESOURCE BLOCK

**CRC** CYCLIC REDUNDANCY CHECK

<b>CSI</b>	CHANNEL STATE INFORMATION
<b>DENM</b>	DECENTRALIZED ENVIRONMENTAL NOTIFICATION MESSAGE
<b>DFDMA</b>	DISTRIBUTED FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS
<b>DFT</b>	DISCRETE FOURIER TRANSFORM
<b>DMRS</b>	DEMODULATION REFERENCE SIGNAL
<b>DwPTS</b>	DOWNLINK PILOT TIME SLOT
<b>ECR</b>	EFFECTIVE CODE RATE
<b>EDVO</b>	EVOLUTION DATA-OPTIMIZED
<b>EESM</b>	EXPONENTIAL EFFECTIVE SINR MAPPING
<b>eNB</b>	EVOLVED NODE B
<b>EPC</b>	EVOLVED PACKET CORE
<b>ETU</b>	EXTENDED TYPICAL URBAN
<b>FCD</b>	FLOATING CAR DATA
<b>FD</b>	FREQUENCY DOMAIN
<b>FDD</b>	FREQUENCY DIVISION DUPLEXING
<b>FFT</b>	FAST FOURIER TRANSFORM
<b>FF</b>	FAST FADING
<b>FME</b>	FIRST MAXIMUM EXPANSION
<b>GBR-ATB</b>	GUARANTEED BIT RATE WITH ADAPTIVE TRANSMISSION BANDWIDTH
<b>GNU</b>	GENERAL PUBLIC LICENSE
<b>GP</b>	GUARD PERIOD



<b>GPS</b>	GLOBAL POSITIONING SYSTEM
<b>GW</b>	GATEWAY
<b>HARQ</b>	HYBRID AUTOMATIC REPEAT REQUEST
<b>HLGA</b>	HEURISTIC LOCALIZED GRADIENT ALGORITHM
<b>IDFT</b>	INVERSE DISCRETE FOURIER TRANSFORM
<b>IFDMA</b>	INTERLEAVED FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS
<b>IQ</b>	INPHASE-QUADRATURE
<b>IRME</b>	IMPROVED RECURSIVE MAXIMUM EXPANSION
<b>ISI</b>	INTERSYMBOLIC INTERFERENCE
<b>ITS</b>	INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS
<b>JCR</b>	JOURNAL CITATION REPORT
<b>LA</b>	LINK ADAPTATION
<b>LENA</b>	LTE EVOLVED PACKET CORE NETWORK SIMULATOR
<b>LFDMA</b>	LOCALIZED FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS
<b>LMF</b>	LARGEST METRIC VALUE FIRST
<b>LS</b>	LEAST SQUARE
<b>LTE</b>	LONG TERM EVOLUTION
<b>MAD<sup>E</sup></b>	MINIMUM AREA-DIFFERENCE TO THE ENVELOPE
<b>MAC</b>	MEDIUM ACCESS CONTROL
<b>MC-SA</b>	MULTI-CARRIER SCHEDULING ALGORITHM
<b>MCS</b>	MODULATION AND CODING SCHEME

**MIESM** MUTUAL INFORMATION BASED EXPONENTIAL SNR MAPPING

**MIMO** MULTIPLE-INPUT MULTIPLE-OUTPUT

**MME** MOBILITY MANAGEMENT ENTITY

**MMSE** MINIMUM MEAN SQUARE ERROR

**NP-HARD** NON-DETERMINISTIC POLINOMIAL

**ODM** OPPORTUNISTIC DUAL METRIC

**OEA** OPPORTUNISTIC AND EFFICIENT RB ALLOCATION ALGORITHM

**OFDM** ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING

**OFDMA** ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING ACCESS

**PAPR** PEAK-TO-AVERAGE POWER RATIO

**PDCCH** PHYSICAL DOWNLINK CONTROL CHANNEL

**PDCP** PACKET DATA CONVERGENCE PROTOCOL

**PF** PROPORTIONAL FAIRNESS

**PFGBR** PROPORTIONAL FAIRNESS WITH GUARANTEED BIT RATE

**PMI** PRECODING MATRIX INDICATOR

**PS** PACKET SCHEDULER

**PUSCH** PHYSICAL UPLINK SHARED CHANNEL

**QAM** QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION

**QBS** QUEUE-BASED SCHEDULING SCHEME

**QoS** QUALITY OF SERVICE

**QPSK** QUADRATURE PHASE-SHIFT KEYING

<b>RB</b>	RESOURCE BLOCK
<b>RC</b>	RESOURCE CHUNK
<b>RI</b>	RANK INDICATOR
<b>RLC</b>	RADIO LINK CONTROL
<b>RME</b>	RECURSIVE MAXIMUM EXPANSION
<b>RR</b>	ROUND ROBIN
<b>RRC</b>	RADIO RESOURCE CONTROL
<b>RRM</b>	RADIO RESOURCE MANAGEMENT
<b>SC-FDMA</b>	SINGLE CARRIER FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS
<b>SINR</b>	SIGNAL TO INTERFERENCE AND NOISE RATIO
<b>SISO</b>	SINGLE-INPUT SINGLE-OUTPUT
<b>SNR</b>	SIGNAL-TO-NOISE RATIO
<b>SRS</b>	SOUNDING REFERENCE SIGNAL
<b>STRA</b>	SINGLE-TIER RESOURCE ALLOCATION
<b>TB</b>	TRANSPORT BLOCK
<b>TBA</b>	TWO-BAR ASSIGNMENT
<b>TD</b>	TIME DOMAIN
<b>TDD</b>	TIME DIVISION DUPLEXING
<b>TTI</b>	TRANSMISSION TIME INTERVAL
<b>TTRA</b>	TWO-TIER RESOURCE ALLOCATION
<b>TU</b>	TYPICAL URBAN

**UBERA** UPPER BOUND ESTIMATION-BASED RESOURCE ALLOCATION

**UE** USER EQUIPMENT

**U<sub>p</sub>PTS** UPLINK PILOT TIME SLOT

**V2I** VEHICLE-INFRASTRUCTURE

**V2V** VEHICLE-VEHICLE

**VoIP** VOICE OVER INTERNET PROTOCOL

**WCDMA** WIDEBAND CODE DIVISION MULTIPLE ACCESS

**XFCD** EXTENDED FLOATING CAR DATA

**ZF** ZERO FORCING

**3GPP** 3RD. GENERATION PARTNERSHIP PROJECT

# Resumen

La red celular evolución a largo plazo (LTE, por sus siglas en inglés) de banda ancha móvil ofrece a los usuarios de telefonía celular altas tasas de transferencia de datos en diversos tipos de aplicaciones, como por ejemplo, juegos en línea, videoconferencias, redes sociales y voz sobre protocolo de internet (VoIP, por sus siglas en inglés). Con la finalidad de cumplir con la transmisión y recepción de grandes cantidades de información, la comunidad científica y la industria están realizando mejoras a la capa física y la capa de control de acceso al medio (MAC, por sus siglas en inglés) de LTE. Como resultado del trabajo conjunto de investigación, científicos y expertos del área han publicado artículos sobre mejoras en eficiencia espectral, algoritmos que optimizan la asignación de recursos, técnicas que permiten un menor consumo de energía, entre otros aspectos. Una de las mejoras más importante de LTE se encuentra en su capa física, la cual permite una mayor robustez ante los efectos de multitrayectoria y efecto Doppler, además de contar con un ancho de banda dinámico que permite la asignación de recursos en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo.

Los avances de investigación y tecnológicos han contribuido para que LTE tenga una capa física mejorada y una capa MAC optimizada. El funcionamiento de ambas capas bajo el estándar de LTE ofrecen: bajos retardos de acceso, escalabilidad y calidad de servicio (QoS, por sus siglas en inglés). Por consiguiente, LTE tiene una gran penetración en el mercado mundial de las Telecomunicaciones. Debido a todas las características antes mencionadas sobre LTE, los fabricantes de automóviles han tomado a LTE como un fuerte candidato para ser implementado en modems inteligentes que puedan detectar choques, carreteras peligrosas, etc., en un contexto de sistemas de transporte inteligente (ITS, por sus siglas en inglés).

Por otra parte, es importante mencionar que el estándar de LTE no proporciona alguna técnica de asignación de recursos en específico. Por tal motivo, los investigadores y diseñadores de algoritmos de asignación de recursos pueden implementar su propia técnica.

Por las razones antes mencionadas, el propósito principal de este trabajo de investigación está centrado en la mejora de una técnica de calendarización. Bajo este contexto, esta tesis presenta el diseño y la implementación de un algoritmo de asignación de recursos, que tenga la capacidad de mejorar el rendimiento (*throughput*) del sistema en entornos de alta movilidad.

El trabajo de investigación aquí presentado se encuentra organizado de la siguiente forma:

La primera sección del trabajo de investigación presenta una introducción de la red celular LTE en redes vehiculares. Además, la justificación, planteamiento del problema y la metodología de investigación del trabajo de tesis.

La segunda sección presenta el marco teórico de la tecnología LTE, asignación de recursos a nivel de subportadora, bloques de recurso, generación de la matriz de estado del canal y adaptación de enlace.

La tercera sección presenta la literatura especializada de los algoritmos de asignación de recursos, y simuladores de LTE que han sido propuestos por otros investigadores del área de las redes celulares.

La cuarta sección presenta el diseño e implementación del algoritmo de asignación de recursos en un simulador de LTE, bajo un entorno vehicular.

La quinta sección presenta la evaluación del algoritmo propuesto a través de las métricas de rendimiento (*throughput*) del sistema, justicia (*fairness*) y tasa de error de bloque (BLER, por sus siglas en inglés).

# Abstract

The cellular network LTE (Long Term Evolution) of mobile broadband, offers cellular telephone users high data transfer rates, in various types of applications, such as online games, video conferencing, social networks, and VoIP (Voice over Internet Protocol). In order to comply with the transmission and reception of large amounts of information, the scientific community and industry are making improvements to the physical layer and the MAC (Medium Access Control) layer of LTE. As a result of joint research work, scientists and experts in the area have published articles on improvements in spectral efficiency, algorithms that optimize resource allocation, techniques that allow lower energy consumption, among other aspects. One of the most important improvements of LTE is found in its physical layer, which allows greater robustness to multipath and Doppler effects, in addition to having a dynamic bandwidth that allows the allocation of resources in the domain of frequency and time domain.

Research and technological advances have contributed so that LTE has an improved physical layer and an optimized MAC layer, the operation of both layers under the LTE standard offers: low access delays, scalability, and QoS (Quality of Service). Consequently, LTE has great penetration in the telecommunications market world. Due to all the aforementioned characteristics about LTE, vehicle manufacturing industry have taken LTE as a strong candidate to be implemented in smart modems that can detect collisions, dangerous roads, and so forth in the context of ITS (Intelligent Transportation Systems).

On the other hand, it is important to mention that the LTE standard does not provide any specific resource allocation technique. Due to this, researchers and designers of resource allocation algorithms can implement their own technique.

For the reasons mentioned above, the main purpose of this research work is focused on improving a scheduling technique. Under this context, this thesis presents the design and implementation of a resource allocation algorithm, which has the ability to improve the throughput, fairness, and block error rate of the system in high mobility environments.

The research work presented here is organized in the following way:

The first section of the research work presents an introduction of the LTE cellular network in vehicular networks. In addition, the justification, statement of the problem, and the research methodology of the thesis work.

The second section presents the theoretical framework of LTE technology, resource allocation at the subcarrier level, resource blocks, generation of the channel state matrix, and link adaptation.

The third section presents the specialized literature on resource allocation algorithms and LTE simulators that have been proposed by other researchers in the area of cellular networks.

The fourth section presents the design and implementation of the resource allocation algorithm, in an LTE simulator under a vehicular environment.

The fifth section presents the evaluation of the proposed algorithm by the performance metrics, system throughput, fairness, and BLER (Block Error Rate).



# Capítulo 1

## Introducción

El sistema evolución a largo plazo (LTE, por sus siglas en inglés) es un protocolo implementado en redes de cuarta generación (4G), y es tomado como referencia para las redes de última generación 5G. LTE cuenta con dos esquemas de acceso múltiple: 1) acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales (OFDMA, por sus siglas en inglés) para el enlace de bajada, y 2) acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única (SC-FDMA, por sus siglas en inglés) para el enlace de subida. La tecnología de LTE está conformada por módulos que utilizan diversas técnicas de procesamiento de señal, lo que proporciona al sistema de banda base mayor robustez en entornos de alta movilidad con efectos de multi-trayectoria y efecto Doppler. Además, LTE proporciona alta tasa de datos a los usuarios, baja latencia a usuarios móviles y calidad de servicio para un determinado tráfico como: voz sobre protocolo de internet (VoIP, por sus siglas en inglés), juego multimedia, redes sociales y videoconferencias.

Por tal motivo, existe un gran interés por parte de los investigadores en realizar estudios exhaustivos de LTE bajo entornos vehiculares de alta movilidad. La degradación de la calidad de canal entre el nodo B mejorado (eNB, por sus siglas en inglés) y el equipo de usuario (UE, por sus siglas en inglés) es un aspecto crucial en un entorno vehicular y, por consiguiente, un desperdicio de recursos de radio<sup>1</sup> en la red celular. Esto conlleva a un tema de investigación relacionado con las técnicas de asignación de recursos, que tenga la capacidad de balancear el rendimiento (*throughput*), justicia (*fairness*) y reducción de la pérdida de recursos de radio.

---

<sup>1</sup>Bloque de recurso formado por 8 símbolos OFDM y 12 subportadoras.

El estándar de LTE no define un algoritmo de asignación de recursos en particular, debido a esto, el investigador puede proponer su propia técnica de acuerdo a sus requerimientos. Sin embargo, las técnicas de asignación de recursos para el enlace bajada y de subida trabajan bajo dos enfoques diferentes, asignación no contigua de radio bloques y asignación contigua de radio bloques, respectivamente. En el contexto de un algoritmo de asignación de recursos en el enlace de subida, el diseño se vuelve un desafío cuando los recursos son asignados de forma contigua en un canal inalámbrico variante en el tiempo, caracterizado por fluctuaciones rápidas (*Fast Fading*).

Existen muchos trabajos propuestos en la literatura que desarrollan modelos matemáticos a través de diferentes objetivos de optimización. Algunos estudios presentan diseños de algoritmos que son evaluados en diferentes entornos, tales como, vehicular, peatonal y urbano. Sin embargo, existe una cantidad considerable de artículos científicos enfocados al enlace de bajada de LTE, los cuales no pueden ser aplicados al enlace de subida, debido a la diferencia que existe en la asignación de recursos para ambos enlaces, subida y bajada. Por tal motivo, nuestro trabajo de investigación, está centrado en el diseño y evaluación de algoritmos de asignación de recursos en el enlace de subida para un escenario vehicular-infraestructura (V2I) en redes LTE. Debido a que LTE es tomado como punto de partida en las redes vehiculares de 5G, el algoritmo también podría implementarse en redes 5G.

Este trabajo de investigación está enfocado en un entorno V2I. Por esta razón, es importante mencionar los requerimientos que LTE debe satisfacer en redes vehiculares bajo un contexto de sistemas de transporte inteligente (ITS, por sus siglas en inglés).

Los ITS intentan satisfacer las necesidades del conductor en carretera, tales como seguridad, eficiencia de tráfico y entretenimiento. La aplicación de seguridad es de mayor relevancia debido a que se intercambian mensajes entre vehículos con la finalidad de informar al conductor de aspectos relacionados con caminos peligrosos, condiciones del clima, posibles accidentes en carretera, alerta de riesgo de choque, notificación de límites de velocidad, etc.

Por lo tanto, este tipo de información permitirá reducir la cantidad de posibles accidentes y, además, planificar el tráfico en situaciones de congestión vehicular. Con el objetivo de satisfacer estos requerimientos, es necesario una infraestructura que permita establecer una comunicación vehículo-infraestructura (V2I) y vehículo-vehículo (V2V).

Bajo el contexto de V2I, la tecnología LTE se ha propuesto como una arquitectura centralizada donde el eNB es responsable de asignar recursos a todas las alertas a saber, las conocidas como los mensajes de conocimiento cooperativo (CAM, por sus siglas en inglés) y los mensajes de notificación del entorno descentralizado (DENM, por sus siglas en inglés). Estos mensajes son enviados por los vehículos que se encuentran bajo la cobertura del eNB a través del enlace de subida.

Por lo tanto, es de gran importancia diseñar y evaluar algoritmos de asignación de recursos que tomen en cuenta alta movilidad en un escenario V2I.

## 1.1. Requerimientos de LTE en redes vehiculares

### 1.1.1. Seguridad

Esta aplicación tiene la finalidad de reducir el número de accidentes en carretera, además, de proporcionar la mayor confiabilidad posible al conductor. Sin embargo, esta aplicación depende de la tecnología utilizada para satisfacer los requerimientos de la aplicación de seguridad. Para cumplir con el aviso oportuno de peligro en carretera, existen dos tipos de mensajes entre el eNB y el vehículo: 1) CAM y 2) DENM. La terminología utilizada es mensaje de seguridad básico (BSM, por sus siglas en inglés) [1].

**CAM:** Son mensajes cortos (conocidos como *beacons* ó *heartbeat*) enviados periódicamente en forma de difusión [1] para que los vehículos identifiquen la posición y movimiento de sus vecinos dentro de su entorno. Los requerimientos de los mensajes CAM, se muestran en la [Tabla 1.1](#).

Requerimientos	Casos	Conec.
Frecuencia de transmisión: 10 Hz.	Alerta de vehículo de emergencia.	
Máxima latencia: 100 ms.	Indicación de vehículos lentos.	
Distancia de cobertura: 300 m - 20 km.	Alerta de choques en intersecciones.	V2V.
Tasa de datos: 1 a 10 Kbps.	Indicación de acercamiento de motocicleta.	V2I.
Longitud: hasta 800 bytes.	Alerta de riesgo de choque.	I2V.

[Tabla 1.1](#): Requerimientos de los mensajes CAM [1], [2], [3].

Los CAM transportan información crítica del estado del vehículo y son transmitidos cada 100 ms [4], debido a que el tiempo de reacción de la mayoría de los conductores es de 0.6 s a 1.4 s. Por lo tanto, es razonable restringir la máxima latencia a 100 ms [5].

**DENM:** Son mensajes cortos de difusión activados por evento. Estos mensajes tienen la finalidad de enviar una alerta al conductor en carretera, sobre un evento peligroso [1]. Los requerimientos de los mensajes DENM, se muestran en la Tabla 1.2.

Requerimientos	Casos	Conectividad
Máxima latencia: 100 ms. Longitud: Menor que CAM.	Intermitentes. Alerta, se toma la ruta equivocada. Accidente vehículo. Accidente vehículo con vehículo. Alerta, la condición de tráfico. Alerta, violación de señal. Alerta, mantenimientos en carretera. Alerta, riesgo de choque. Ubicación de peligro en carretera. Alerta, neblina. Alerta, visibilidad.	V2V, V2I, I2V.

Tabla 1.2: Requerimientos de los mensajes DENM [1], [2].

Las Tablas 1.1 y 1.2 muestran tres parámetros importantes: 1) requerimientos en términos de latencia, para garantizar la confiabilidad de transmisión y recepción de CAM o DENM, 2) casos de alertas, los cuales están fundamentados en los requerimientos de confiabilidad-latencia, y 3) la conectividad requerida para satisfacer los requerimientos de seguridad en los ITS.

### 1.1.2. Eficiencia de tráfico

Esta aplicación optimiza el tráfico en carretera mediante la información de la congestión de tráfico [2]. Para este caso, los requerimientos de retardo y calidad de servicio (QoS) no son muy estrictos. Sin embargo, este servicio depende del uso constante de los servicios web.

Esta aplicación se encuentra definida por dos tipos de servicios: 1) datos de carro flotante (FCD, por sus siglas en inglés) y 2) datos de carro flotante extendido (XFCD, por sus siglas en inglés) [1].

- FCD: Estos datos contienen la información sobre la velocidad y el posicionamiento de un sistema de navegación (GPS) ó *smartphone* dentro del vehículo. Con la información coleccionada por el GPS, el FCD sugiere rutas alternativas con la finalidad de evitar el tráfico vehicular [6].
- XFCD: Estos datos realizan la previsión de tráfico de forma más confiable que el FCD, de tal forma que colecciona datos del control de cruceo autónomo del sensor de lluvia y de la cámara al interior del vehículo. Estos datos recopilados a través del bus de red de área de controlador (CAN, por sus siglas en inglés) [6] ofrecen información más precisa sobre el tráfico vehicular. Por otra parte, los requerimientos de la eficiencia de tráfico se muestran en la [Tabla 1.3](#).

Requerimientos	Conectividad
Máxima latencia: 200 ms.	V2I, I2V.
Distancia de cobertura: 300 m - 5 km.	
Frecuencia de transmisión: 10 Hz.	
Tasa de datos: 1- decenas de kbps.	

[Tabla 1.3](#): Requerimientos de los mensajes de eficiencia de tráfico [1], [3].

### 1.1.3. Comodidad y entretenimiento

Esta aplicación tiene por objetivo hacer fácil la vida diaria del conductor en carretera [1] y proporcionar comodidad al pasajero [3]. La comodidad y entretenimiento está enfocada a la transmisión de audio y video por Internet, descarga de contenido de multimedia, búsquedas por Internet, redes sociales, actualizaciones de blog, juegos y acceso a diferentes servicios de *cloud* [1]. Los requerimientos de esta aplicación se muestran en la [Tabla 1.4](#).

Requerimientos	Conectividad
Máxima latencia: 500 ms. Frecuencia de transmisión: 1 Hz. Tasa de datos: decenas-cientos de kbps (dependiendo del contenido).	V2V, V2I, I2V.

Tabla 1.4: Requerimientos de entretenimiento [1], [3].

## 1.2. Justificación

Con el objetivo de satisfacer los requerimientos de ITS, en [7] se propone el marco de referencia de las redes vehiculares heterogéneas con base en cluster (C-HetVNET, por sus siglas en inglés). Este enfoque consiste en: miembros del cluster (CM, por sus siglas en inglés), el cual está formado por un determinado número de vehículos en un área determinada y el líder del cluster (CH, por sus siglas en inglés) como un vehículo principal que coordina los mensajes recibidos provenientes de los CM, y enseguida, los retransmite hacia el eNB. El autor asume que los vehículos contienen un dispositivo que cuenta con dos tecnologías inalámbricas: LTE y 802.11p y, además, cuenta con un GPS para efectos de ubicación geográfica del vehículo.

En la [Figura 1.1](#) se muestra el escenario principal de C-HetVNET. La comunicación vehículo a vehículo (V2V, por sus siglas en inglés) es cubierta por la tecnología 802.11p, y LTE suministra cobertura al enlace de comunicación vehículo a infraestructura (V2I, por sus siglas en inglés) entre el CH y el eNB.

El mecanismo del cluster, consta de dos fases:

- **Inicialización:** Todos los vehículos envían un mensaje de petición (señalización) de cluster al eNB, una vez que este recibe la petición, transmite un mensaje de recibido y aprobación para que los vehículos puedan enviar un reporte de información (velocidad, ubicación, etc.) al eNB. El eNB con el reporte recibido ejecuta un algoritmo que le permite crear un cluster, al concluir la ejecución, el eNB envía a los vehículos la información del CH y CM asociados al cluster.
- **Mantenimiento:** Actualización del cluster a través de nuevas llegadas de vehículos al área de cobertura del cluster.

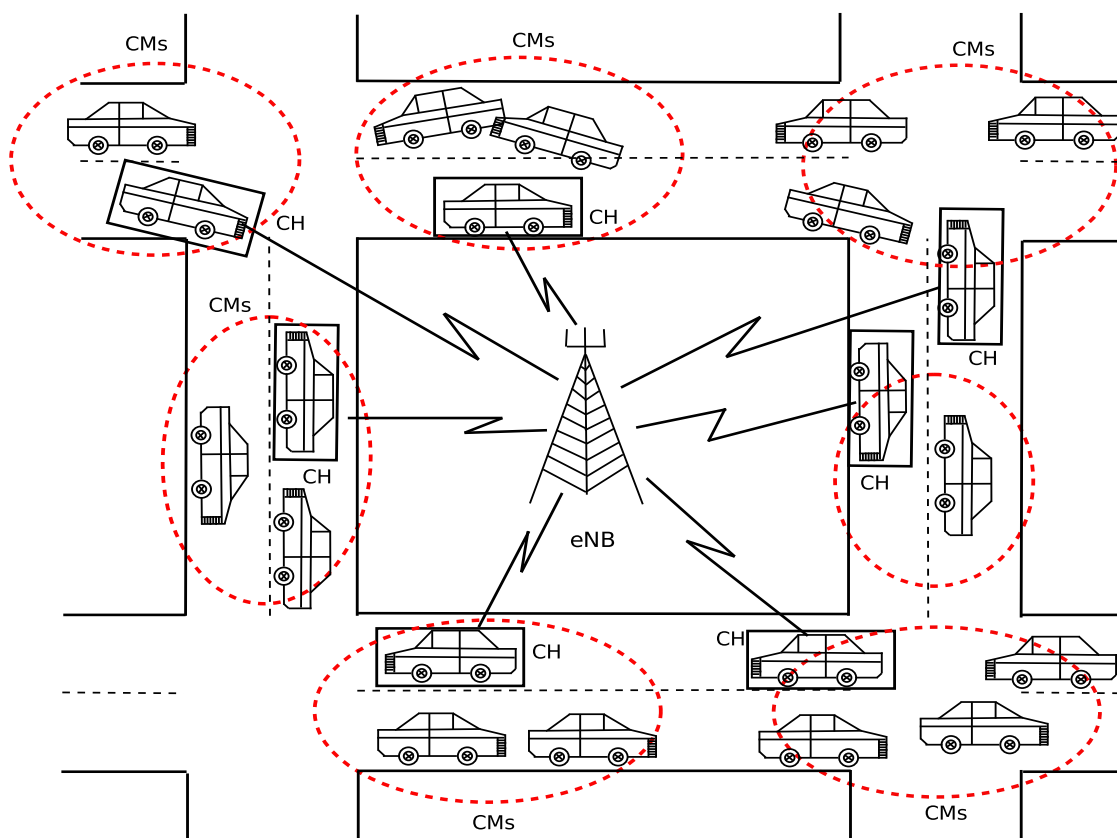


Figura 1.1: Transmisión de mensajes CAM en un entorno vehicular a través de LTE [7].

### Proceso de envío de paquetes:

- Los vehículos del CM envían información (posición y movimiento) al CH mediante la tecnología 802.11p. El CH se encarga de coleccionar todos los mensajes recibidos y colocarlos en un *buffer* (ver Figura 1.1).
- Los mensajes contenidos en el *buffer* del CH son transmitidos al eNB sobre el enlace de subida mediante la tecnología LTE (ver Figura 1.1).

Los autores en [7] evalúan tres tipos de calendarizadores para el enlace de subida de LTE: *round robin* (RR, por sus siglas en inglés), esquema de calendarización con base en el canal (CBS, por sus siglas en inglés) y esquema de calendarización con base en colas (QBS, por sus siglas en inglés). RR asigna los recursos de forma equitativa a los CHs, independientemente de su calidad del canal, QBS asigna recursos a los CHs con mayor longitud de cola, y el CBS favorece a los CHs que tienen mejor calidad de canal.

Los autores de [7] concluyen que el CBS tiene el mejor desempeño en comparación con los otros esquemas de asignación de recursos bajo escenarios de tráfico de información muy pesado, incluso en situación de saturación.

El algoritmo de asignación de recursos (*scheduler*) en el enlace de subida de la tecnología LTE juega un papel muy importante en ITS. La función principal del calendarizador consiste en asignar bloques de recurso (RB, por sus siglas del inglés) a los CH con el objetivo de transmitir sus mensajes sobre los RB, como por ejemplo, las alertas de accidentes, ubicación geográfica de los vehículos vecinos, entre otros tipos de mensajes que se requieren para satisfacer las aplicaciones de los ITSs.

El enfoque de redes vehiculares soportados en redes celulares (LTE) da origen a la inserción de un nuevo elemento de red, el *GeoServer*, que funciona como un mensaje reflector para facilitar la comunicación entre vehículos (V2V). El *GeoServer* procesa los mensajes recibidos de cada vehículo con el objetivo de proveer información del área geográfica de cada vehículo (ver Figura 1.2). Después, los mensajes son retransmitidos a todos los vehículos que se encuentran en la misma cobertura de comunicación [8].

La Figura 1.2 muestra el proceso del envío de mensajes activados por evento, bajo el contexto de un choque automovilístico. Un mensaje de alerta es enviado a través del enlace de subida en modo dirigido. Este mensaje cruza toda la infraestructura de LTE para arriar al servidor, el cual contiene la posición de los vehículos vecinos más cercanos a la zona del accidente. Después, un mensaje con las coordenadas correspondientes es transmitido a los vehículos a través del enlace de bajada. Este mensaje de alerta es diseminado en modo de multidifusión (*broadcast*) a la zona potencialmente más afectada. Por último, el conductor recibirá el mensaje de alerta de choque con la finalidad de tomar las precauciones adecuadas.

De los dos escenarios presentados en las Figuras 1.1 y 1.2, la comunicación entre vehículos se realiza a través de la tecnología 802.11p, y el envío de información de los vehículos, a la infraestructura de red celular (eNB) se realiza mediante el enlace de subida de LTE. Bajo este contexto, el calendarizador es la interface más importante entre las tecnologías 802.11p y LTE. Por otra parte, los resultados obtenidos en [7] demuestran que el algoritmo de calendarización dependiente del canal presentó el mejor rendimiento (*throughput*) en grandes cantidades de tráfico. Lo que nos motiva a orientar nuestro trabajo de investigación, al estudio y diseño de algoritmos de calendarización para enlace de subida de LTE.



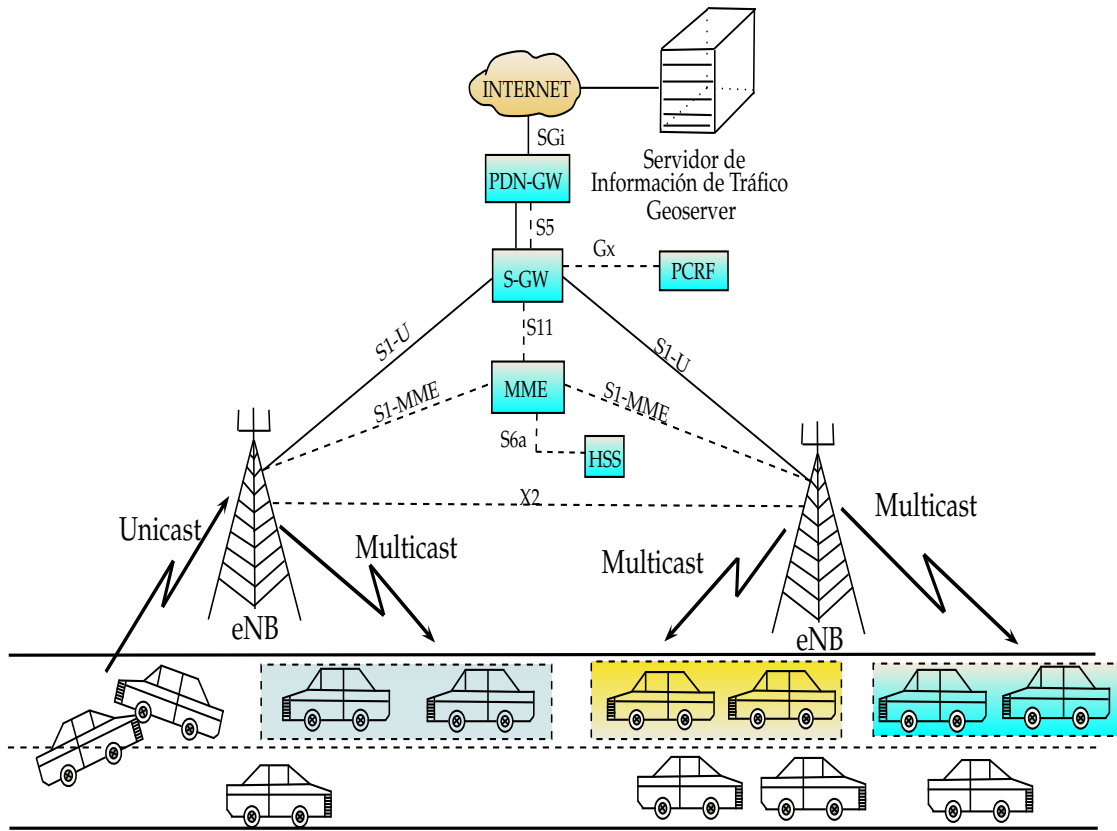


Figura 1.2: Transmisión de mensajes DENM en un entorno vehicular a través de LTE [5].

### 1.3. Planteamiento del problema

En un escenario vehicular-infraestructura (V2I), la calendarización de enlace de subida es crucial para asignar recursos de radio a los mensajes generados por los vehículos para su transmisión. Por tal motivo, es necesario conocer la calidad de canal entre el vehículo y la infraestructura LTE para asignar los recursos de radio de forma óptima. La asignación de recursos de radio no es óptima cuando los RB son asignados a los vehículos que experimentan mala calidad de canal. Debido a que estos tienen alta probabilidad de perder el enlace de comunicación y, por consiguiente, el rendimiento (*throughput*) estará afectado considerablemente, lo que significa una pérdida monetaria para las empresas que proporcionan el servicio de portadora (*carriers*) de telefonía celular.

El diseño de algoritmos de asignación de recursos para el enlace de subida de LTE debe considerar las siguientes restricciones:

- El enlace de subida de LTE no fue diseñado para transmitir grandes cargas de tráfico en diversos escenarios de alta movilidad.
- La asignación de recursos mediante el posicionamiento de las subportadoras en el esquema de acceso múltiple, para el enlace de subida de LTE, requiere de un consumo de potencia óptimo, debido a que el usuario móvil tiene un presupuesto limitado de potencia.
- La restricción más importante, en el diseño del algoritmo para la asignación de recursos, se presenta cuando la asignación de RB a un usuario<sup>2</sup>, se realiza de forma contigua; esto significa que, el algoritmo debe realizar una búsqueda exhaustiva de la combinación óptima RB-UE. Por esta razón, el algoritmo de calendarización se considera como un problema de optimización de polinomio no determinístico complejo (NP-HARD, por sus siglas en inglés).

---

<sup>2</sup>El término vehículos será sustituido por el término usuarios, debido al contexto de los algoritmos de calendarización.

- Debido a que la asignación de RB a un usuario deben ser adyacentes, la adaptación de modulación y codificación de LTE se sustenta en la asignación del mismo índice del indicador de la calidad de canal (CQI, por sus siglas del inglés) a sus RB contiguos. Una asignación incorrecta del CQI, se reflejará en la asignación de un mayor número bits de modulación a usuarios que experimenten una mala calidad de canal. Por lo tanto, el rendimiento del sistema ofrecerá una degradación considerable, además de presentar un alto desperdicio de recursos de radio.

Debido a las restricciones antes mencionadas, los algoritmos de asignación, propuestos en la literatura para el enlace de bajada de LTE, no pueden ser directamente aplicados a los algoritmos de asignación de enlace de subida.

Por otra parte, la literatura especializada no presenta estudios exhaustivos sobre el calendarizador dependiente del canal (CDS, por sus siglas en inglés) en escenarios, que tomen en cuenta los efectos de multitrayectoria y diferentes velocidades del usuario.

## 1.4. Hipótesis

*La asignación inadecuada del índice del indicador de la calidad de canal (CQI, por sus siglas en inglés), un algoritmo de asignación de recursos no adaptado al enlace de subida de LTE y una adaptación de enlace no optimizada para canales vehículo-infraestructura, conducen a una degradación considerable del rendimiento del sistema LTE y una pérdida considerable de los recursos de radio. El estudio y abordaje conjunta del índice de CQI, asignación de recursos de radio y adaptación de enlace, proporcionan mayores elementos de decisión para la asignación de recursos que mejoren el rendimiento y la tasa de error de bloque del sistema de LTE en canales inalámbricos con valores bajos del cociente de la potencia de la señal sobre la potencia del ruido (SNR, por su siglas en inglés) y fluctuaciones rápidas.*

## 1.5. Objetivos del trabajo de investigación

### 1.5.1. Objetivo general

Diseñar un algoritmo de asignación de recursos (CDS) que mejore el rendimiento del sistema (*throughput*) LTE a través de las siguientes restricciones: 1) adyacencia en la asignación de RB a un usuario y 2) la asignación de un mismo índice de CQI a los RB asignados a un usuario. Así mismo, implementar el algoritmo de asignación de recursos en un simulador a nivel de enlace de LTE, bajo escenarios de alta movilidad y con diferentes valores de velocidad. Finalmente, evaluar el desempeño del algoritmo implementado a través de las métricas de evaluación: 1) rendimiento, 2) justicia y 3) tasa de error de bloque.

Por otra parte, para asignar recursos de forma moderada a los usuarios con mala calidad de canal, implementar una modificación al algoritmo de adaptación de enlace (LA, por sus siglas en inglés) de LTE.

### 1.5.2. Objetivos específicos

- Evaluar los diferentes tipos de procesamiento para la asignación de subportadora para el enlace de subida de LTE.
- Diseñar el algoritmo de asignación de recursos exclusivo para el enlace de subida de LTE.
- Implementar el algoritmo de asignación de recursos de forma heurística en un simulador de LTE a nivel de enlace.
- Modificar el algoritmo del enlace de adaptación clásico de LTE.
- Asignar el CQI tomando en cuenta diferentes variantes.
- Estudiar el desempeño del algoritmo implementado bajo un canal vehicular extendido que contenga efecto de multitrayectoria.
- Evaluar el algoritmo implementado bajo diferentes valores de velocidades cambiando el número de usuarios.

- Presentar gráficas de evaluación de los resultados obtenidos.
- Publicar los resultados.

## 1.6. Metodología de la investigación

Para cumplir con los objetivos antes propuestos, se propuso la siguiente metodología

- Estudio preliminar de la asignación de recursos en la tecnología LTE.
- Estudio de la adaptación de enlace en LTE.
- Estudio de la generación de bloques de recursos físicos en LTE.
- Estudio del estado del arte sobre los algoritmos de asignación de recursos en enlace de subida, enfocado al sistema LTE.
- Estudio del simulador a nivel de enlace de LTE para enlace de subida.
- Diseño del algoritmo de asignación de recursos para enlace de subida, con base en la revisión de la literatura especializada.
- Diseño de la adaptación de enlace mejorado y de las variantes de la asignación del índice de CQI.
- Implementación del algoritmo de asignación de recursos, adaptación de enlace mejorado y variantes de la asignación del índice de CQI en el simulador LTE.
- Análisis de resultados mediante la evaluación de desempeño conjunta del algoritmo de asignación de recursos, adaptación de enlace y variantes de la asignación del índice de CQI.

## 1.7. Contribución

- En este trabajo de investigación se propone una mejora de la adaptación de enlace capaz de asignar una tasa de bits moderada a los usuarios con un canal variante en el tiempo. El algoritmo de adaptación de enlace mejorado propuesto es capaz de reducir la pérdida de recursos de radio en un canal vehicular-infraestructura de LTE caracterizado por rápidas fluctuaciones.
- Se proponen dos variantes de asignación del índice de CQI capaces de asignar la modulación y codificación acorde a los efectos de un canal vehicular-infraestructura para la tecnología de LTE.
- Se propone la implementación y el análisis de 3 factores cruciales que influyen en la asignación de recursos del enlace de subida LTE (vehículo a infraestructura): 1) el algoritmo de asignación de recursos en el dominio de la frecuencia, con restricción de adyacencia en los RB, 2) adaptación de enlace y 3) asignación del índice de CQI.
- Se presenta un estudio a nivel de portadora, de los 3 módulos principales en la calendarización de paquetes, bajo un canal inalámbrico con valores bajos de SNR y diferentes velocidades.
- Se presenta una evaluación mediante diferentes métricas para corroborar la efectividad de las mejoras propuestas en este trabajo de tesis. Como resultado se obtiene una maximización del rendimiento, y baja pérdida de recursos de radio en entornos con rápidas fluctuaciones (comunmente un canal vehicular). Estos resultados permiten obtener un beneficio significativo en términos económicos, dado que los canales de 4G y 5G se cotizan en miles de millones de pesos.
- Derivado de los resultados obtenidos en este trabajo de tesis, se publicó un artículo en la revista Elektronika ir Elektrotechnika [9].

## 1.8. Estructura del documento

Para satisfacer los objetivos planteados al inicio de este trabajo de tesis, la estructura del documento se presenta de la siguiente forma:

- El capítulo 1 presenta una introducción de la comunicación vehicular-infraestructura de LTE bajo un contexto de ITS. También, presenta la justificación, planteamiento del problema, hipótesis, objetivo del trabajo, metodología de investigación y contribución de este trabajo de tesis.
- El capítulo 2 presenta una breve introducción de la tecnología LTE, una evaluación en potencia de la asignación de las subportadoras a los usuarios de forma localizada y distribuida. Finalmente, proporciona un estudio del proceso de adaptación de enlace y generación de los RB mediante al matriz del estado del canal.
- El capítulo 3 presenta un revisión de la literatura especializada relacionada con los algoritmos de asignación de recursos para el enlace de subida de LTE. Además, presenta una revisión de la literatura sobre los simuladores a nivel de enlace de la tecnología LTE existentes en el estado del arte.
- El capítulo 4 presenta el análisis teórico y diseño del algoritmo de asignación de recursos, la adaptación de enlace clásico, la adaptación de enlace mejorado y las variantes de la asignación del índice de CQI.
- El capítulo 5 presenta la evaluación de desempeño de los algoritmos implementados en el simulador de LTE. Además, presenta una análisis de resultados con base en los resultados obtenidos de la evaluación.
- El capítulo 6 presenta las conclusiones generales y la verificación de la hipótesis del trabajo de investigación.

# Capítulo 2

## Marco de referencia

### 2.1. Introducción

El diseño e implementación de un calendarizador de la tecnología evolución a largo plazo (LTE, por sus siglas en inglés) requiere del conocimiento de distintos módulos de procesamiento de señales del sistema. Por tal motivo, es importante manejar diferentes conceptos de LTE, tales como estructura del frame, esquema de acceso múltiple, tipos de asignación de subportadoras a los usuarios, bloque de recursos, predicción de canal, adaptación de enlace, generación de la matriz de estado del canal y generación de los bloques de recursos. Esto conlleva a considerar varios aspectos importantes, como la estructura del frame que define el tipo de duplexación y el tiempo de subframe correspondientes a 14 símbolos. Estos parámetros permiten al calendarizador definir la asignación de recursos en el dominio del tiempo. Otro aspecto relevante está relacionado con el esquema de acceso múltiple, el cual es crucial en un sistema de comunicaciones celulares debido a que permite reducir latencias e incrementar considerablemente la tasa de datos del sistema. El acceso múltiple es una técnica que permite a múltiples usuarios compartir el mismo canal de comunicaciones. El acceso múltiple en conjunto con el calendarizador determinan la cantidad de ancho de banda (dominio de la frecuencia) que se le asigna a los usuarios. Los esquemas de acceso múltiple para el enlace de subida y de bajada son el acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales (OFDMA, por sus siglas en inglés) y el acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única (SC-FDMA, por sus siglas en inglés), respectivamente.



La diferencia que presentan tales esquemas radica en que OFDMA es una técnica multiportadora, mientras que SC-FDMA es una técnica de una sola portadora. Sin embargo, OFDMA presenta un gran consumo de potencia y, por consiguiente, no es factible que el usuario móvil opere sobre esta técnica. Por lo tanto, SC-FDMA es la técnica más apropiada para el enlace de subida de LTE.

Por otra parte, el calendarizador debe utilizar algún tipo de asignación de subportadoras que permita optimizar el consumo de potencia del usuario móvil. Para conocer este tipo de información es importante evaluar la asignación distribuida (intercalada) y localizada (contigua) de subportadoras bajo los diferentes esquemas de acceso múltiple. Esto con el objetivo de utilizar el tipo de asignación más óptimo en consumo de potencia para el diseño del calendarizador. El calendarizador asigna recursos en pequeños bloques de recursos definidos por el estándar de LTE como bloque de recurso (RB), el cual consta de 12 subportadoras (180 kHz) y 14 símbolos de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM, por sus siglas en inglés). Sin embargo, para asignar RB a los usuarios es muy importante cuantificar la calidad de canal del usuario, ya que si el calendarizador asigna RB a un usuario que tiene una degradación considerable de su señal, esto conducirá a una pérdida de recursos de radio. Por lo tanto, es indispensable hechar mano de las técnicas de predicción de canal, y adaptación de enlace para minimizar el desperdicio de recursos. Una vez que se tiene toda la información de estado del canal, la información es almacenada en una matriz para definir los RB de 12 subportadoras con 14 símbolos OFDM.

Como podemos notar, es importante definir diversos conceptos de LTE para el diseño e implementación de un calendarizador.

Este capítulo aborda diversos temas de la tecnología LTE, tales como una introducción de la tecnología LTE, un estudio de la estructura del frame de FDD y TDD, un análisis, estudio y diagramas a bloque de los esquemas de acceso múltiple. Además, un estudio, modelado y evaluación de la asignación de recursos a nivel de subportadora y grupo de subportadoras con SC-FDMA y OFDMA, bajo las asignaciones del tipo, localizado y distribuido. También, se aborda el estudio de la calendarización en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Finalmente, la generación de RB mediante el estudio, análisis y procedimientos de la predicción de canal, adaptación de enlace, y generación de la matriz de estado del canal.

## 2.2. Tecnología LTE

LTE (4G) es una tecnología inalámbrica de banda ancha establecida por el estándar tercer proyecto de asociación de generación (3GPP, por sus siglas del inglés). LTE proporciona más datos por Hertz, en términos de eficiencia espectral, ancho de banda escalable de (1.4, 3, 5, 10, 20 MHz) hasta 20 MHz, baja latencia, tráfico por conmutación de paquetes y mayor robustez ante los efectos de multitrayectoria debido a que utiliza un esquema de acceso múltiple OFDMA. En comparación con las tecnologías de redes celulares antecesoras, tales como el acceso múltiple por división de código (CDMA, por sus siglas en inglés) y el acceso múltiple por división de código de banda amplia (WCDMA, por sus siglas en inglés) [10] que utilizan canales de 1.5 MHz y 5 MHz, respectivamente. LTE presenta mejoras en cuanto a eficiencia espectral, y múltiple entrada y múltiple salida (MIMO, por sus siglas en inglés) que mejoran la tasa de datos del sistema.

### 2.2.1. Estructura del *Frame*

La duplexación en LTE utiliza dos esquemas: duplexación por división de frecuencia (FDD, por sus siglas en inglés) y duplexación por división de tiempo (TDD, por sus siglas del inglés). El esquema FDD realiza la transmisión y recepción de datos mediante el enlace de subida y de bajada, respectivamente. Además, este esquema utiliza frecuencias dedicadas para cada uno de los enlaces (asignación de espectro simétrico) como se muestra en la [Figura 2.1](#). El esquema TDD opera dentro de una misma frecuencia (asignación de espectro asimétrico) para ambos enlaces de subida y de bajada [11] como se muestra en la [Figura 2.2](#).

La estructura FDD está dividida en: 1 frame de 10 ms, equivalente a 10 subframes, en donde 1 subframe de 1 ms es equivalente a 2 ranuras (*slots*) y 1 ranura contiene 7 símbolos OFDM, con prefijo cíclico normal, o 6 símbolos con prefijo cíclico extendido (ver [Figura 2.1](#)).

La TDD requiere de una banda de guarda para evitar la interferencia entre los canales de subida y de bajada, lo que conduce a un decremento de la capacidad del sistema LTE, mientras que las bandas de guarda de FDD son de forma independiente para ambos enlaces. El estándar 3GPP toma como punto de partida la FDD, además la selección del tipo de duplexación está relacionado con aspectos de política y de regulación del espectro radieléctrico [12]. En México las bandas de frecuencias están destinadas para LTE FDD [13].

Por las razones antes mencionadas, es importante remarcar que el diseño e implementación del calendarizador presentado en este trabajo de tesis está desarrollado bajo la estructura de frame FDD.

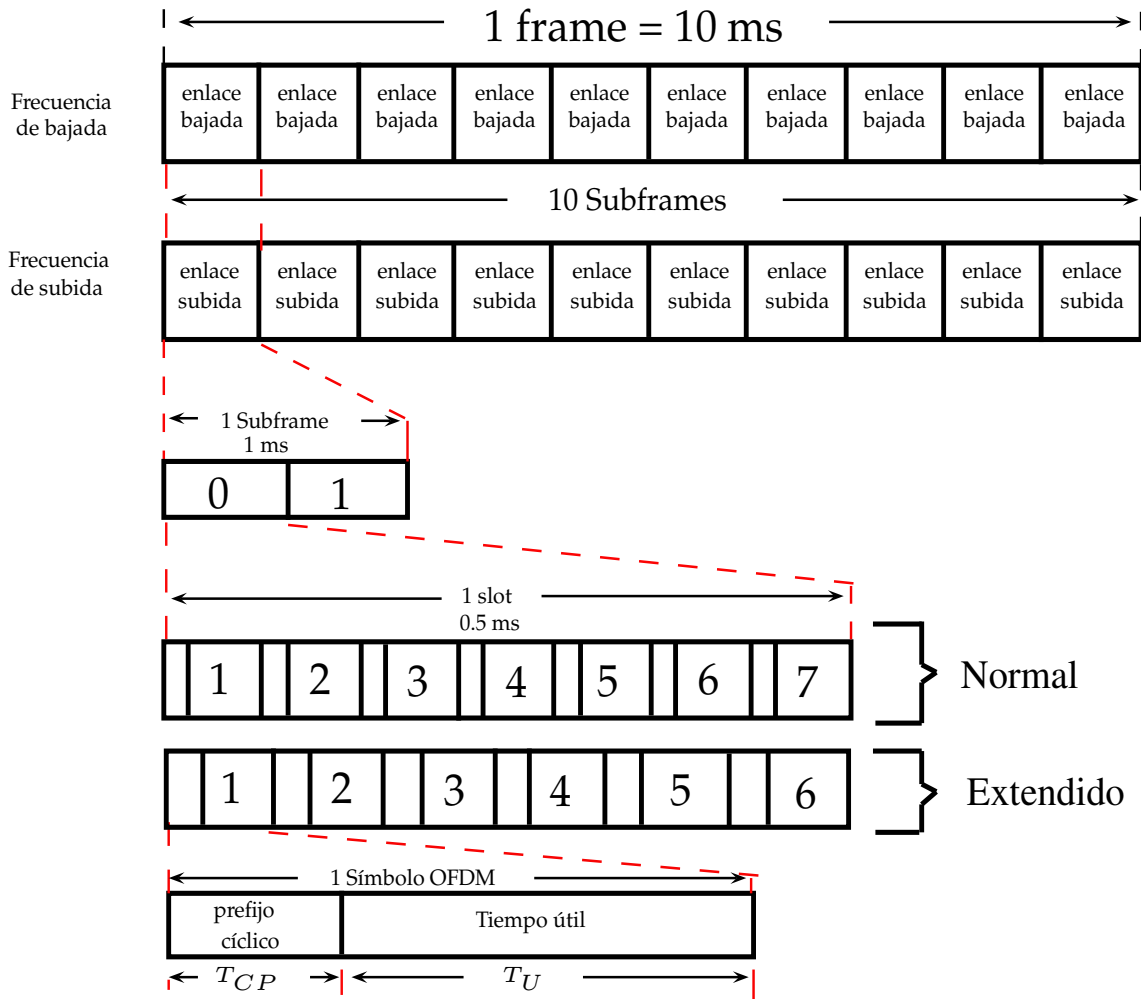


Figura 2.1: Estructura de radio frame tipo 1: FDD.

En la Figura 2.2, se muestran 7 configuraciones de TDD, donde el radio frame de 10 ms, se divide en 2 frames de 5 ms, y cada frame es equivalente a 5 subframes. Un subframe está configurado con 3 campos especiales: 1) ranura de tiempo piloto del enlace de bajada (DwPTS, por sus siglas en inglés), 2) periodo de guarda (GP, por sus siglas en inglés) y 3) ranura de tiempo piloto del enlace de subida (UpPTS, por sus siglas en inglés) utilizado para indicar el cambio de enlace (enlace subida-a-enlace bajada ó enlace bajada-a-enlace subida) [14].

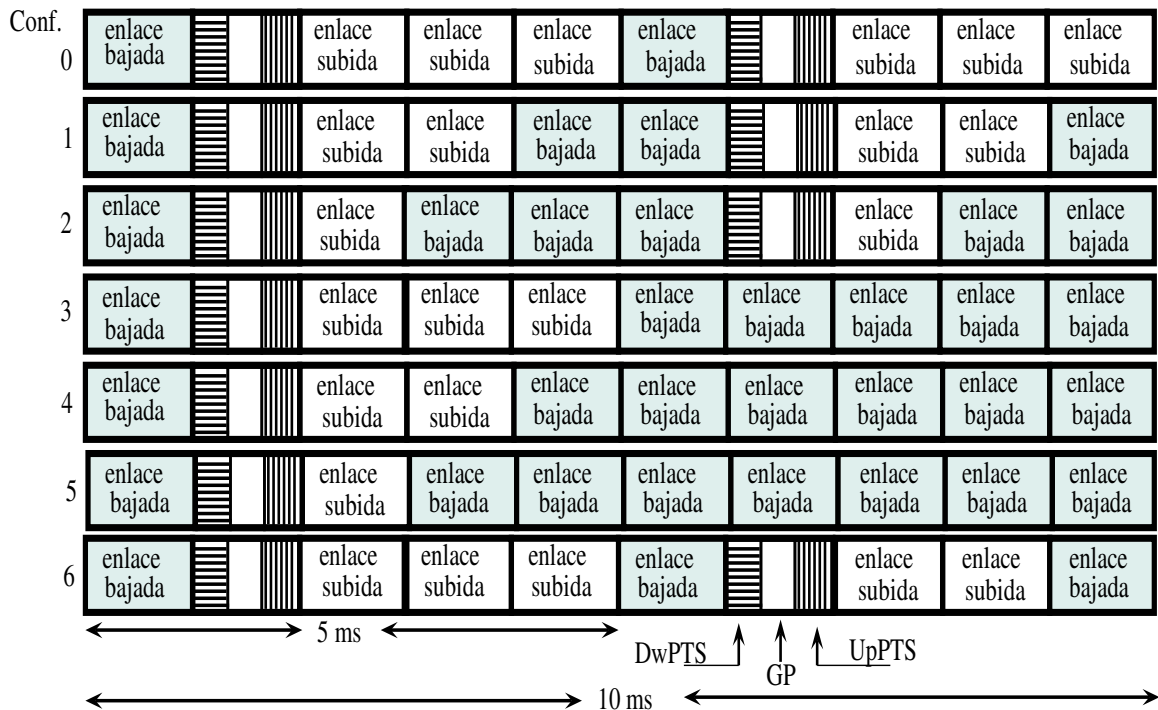


Figura 2.2: Estructura de radio frame tipo 2: TDD.

Con el objetivo de calcular el tiempo de una ranura en LTE bajo la estructura FDD, se emplean las siguientes expresiones:

Para el caso de un prefijo cíclico normal, el tiempo del prefijo es [14]:

$$T_s = \frac{1}{N_{FFT} \times \Delta f}$$

$$T_{CP} = 160 \times T_s, \quad T_U = 2048 \times T_s, \text{ para el primer símbolo,}$$

$$T_{CP} = 144 \times T_s, \quad T_U = 2048 \times T_s, \text{ para los símbolos restantes;}$$

Para el caso de un prefijo cíclico extendido, el tiempo del prefijo es [14]:

$$T_{CP} = 512 \times T_s, \quad T_U = 2048 \times T_s, \text{ para todos los símbolos.}$$

Donde  $T_s$  es el tiempo del símbolo en segundos (s),  $T_{CP}$  es el tiempo del prefijo cíclico en segundos (s),  $T_U$  es el tiempo útil en segundos (s),  $N_{FFT}$  es el tamaño de la transformada de Fourier, para LTE es 2048 y  $\Delta f$  es el ancho de banda por subportadora de 15 kHz.

Se tiene que el tiempo del símbolo OFDM está dado por:

$$T_{S\_OFDM} = T_{CP} + T_U. \quad (2.1)$$

Por lo tanto, el tiempo de ranura en LTE para el caso normal se obtiene a través de la Ecuación (2.1):

$$\begin{aligned} T_{ranura} &= 160 \times \left( \frac{1}{15000 \times 2048} \right) + 2048 \times \left( \frac{1}{15000 \times 2048} \right) + \\ &6 \times \left[ 144 \times \left( \frac{1}{15000 \times 2048} \right) + 2048 \times \left( \frac{1}{15000 \times 20148} \right) \right] = \\ &0.5 \times 10^{-3} = 0.5 \text{ ms}. \end{aligned}$$

De acuerdo al resultado obtenido, se puede verificar que, en efecto, el tiempo de una ranura (*slot*) para el caso de prefijo cíclico normal es 0.5 ms.

Para el caso extendido, el tiempo de ranura es el siguiente:

$$T_{ranura} = 6 \times \left[ 512 \times \left( \frac{1}{15000 \times 2048} \right) + 2048 \times \left( \frac{1}{15000 \times 2048} \right) \right] = 0.5 \times 10^{-3} = 0.5 \text{ ms}.$$

De los cálculos realizados arriba, resulta que el tiempo de ranura es de 0.5 ms, para ambos casos. Por lo tanto, se verifica que un *subframe* es equivalente a 2 ranuras con un tiempo de símbolo de 1 ms o un intervalo de tiempo de transmisión (TTI, por sus siglas en inglés), donde el TTI es el tiempo (1 ms) con el que cuenta el calendarizador para asignar recursos a los usuarios en la celda de LTE.

Es importante remarcar que el prefijo cíclico extendido tiene una mayor longitud de prefijo; lo que permite una mayor robustez ante los canales con mala calidad. Sin embargo, el precio que hay que pagar es un menor rendimiento en el sistema total y la disminución del tiempo útil de los símbolos OFDM dentro de la ranura (ver [Figura 2.1](#)).

### 2.2.2. Esquemas de acceso múltiple

Hoy en día, las aplicaciones inalámbricas requieren de una alta velocidad de datos para transmitir una gran cantidad de información. Sin embargo, un sistema de ancho de banda amplia es susceptible en los canales selectivos en frecuencia dando origen a una interferencia intersimbólica (ISI, por sus siglas en inglés) considerable. Por esta razón, la técnica de multiportadora OFDM se ha utilizado para enfrentar mejor los efectos de frecuencia selectiva. En el dominio de la frecuencia, la técnica multiportadora subdivide todo el canal en pequeñas subbandas o subportadoras.

El esquema de acceso múltiple OFDMA consiste en utilizar la técnica de modulación multiportadora OFDM, el cual multiplexa los datos en frecuencias ortogonales (subportadoras) para después transmitirlos en paralelo. Esto significa que OFDM divide las señales digitales de alta velocidad en señales de velocidades más lentas y, a su vez, son enviadas en diferentes subportadoras transmitidas de forma paralela. Es importante remarcar la siguientes características de OFDM:

- Con el objetivo de reducir la complejidad del proceso de ecualización. Cada subportadora debe estar caracterizada como un canal de desvanecimiento plano (*flat fading*) en el dominio de la frecuencia. Por lo tanto, el ancho de banda de cada subportadora debe ser suficientemente pequeño como para considerar su desvanecimientos en un nivel constante.
- OFDM reduce considerablemente el efecto del ISI mediante la partición de un *stream* de alta tasa de datos en varios *streams* de baja tasa de datos (transmitidos en paralelo), como se muestra en la [Figura 2.3](#).
- OFDM presenta un alto cociente de la potencia pico sobre la potencia promedio (PAPR, por sus siglas en inglés) y alta sensibilidad al desplazamiento (*offset*) de frecuencia. Dando lugar a una debilidad considerable de OFDM.
- OFDMA es utilizado en el enlace bajada de LTE sustentado en la modulación OFDM.

Figura 2.3 muestra el esquema de acceso múltiple OFDMA utilizado en LTE. OFDM asigna cada símbolo de modulación a una subportadora y, a su vez, OFDMA asigna un número determinado de subportadoras a cada usuario [17]. En el contexto del estándar LTE, el *stream* de datos de forma serial está formado de símbolos de modulación. Estos deben utilizar cualquiera de los tipos de modulaciones digitales, tales como la modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK, por sus siglas en inglés) y modulación de amplitud en cuadratura (QAM, por sus siglas en inglés) de 16 y 64 símbolos. Cada símbolo recibido de forma serial es paralelizado, de tal forma que es asignado a subportadoras ortogonales. Después, las subportadoras son agrupadas, y cada grupo es asignado a cada usuario mediante el bloque de mapeo de subportadoras. Estos grupos son introducidos al módulo de la transformada inversa de Fourier discreta (IDFT, por sus siglas en inglés) con la finalidad de llevar a cabo la modulación OFDM. A la salida del módulo de la IDFT se obtiene la señal temporal equivalente. Finalmente, a la señal OFDM resultante, en el dominio del tiempo, se le agrega un prefijo cíclico para combatir los efectos de la respuesta al impulso del canal.

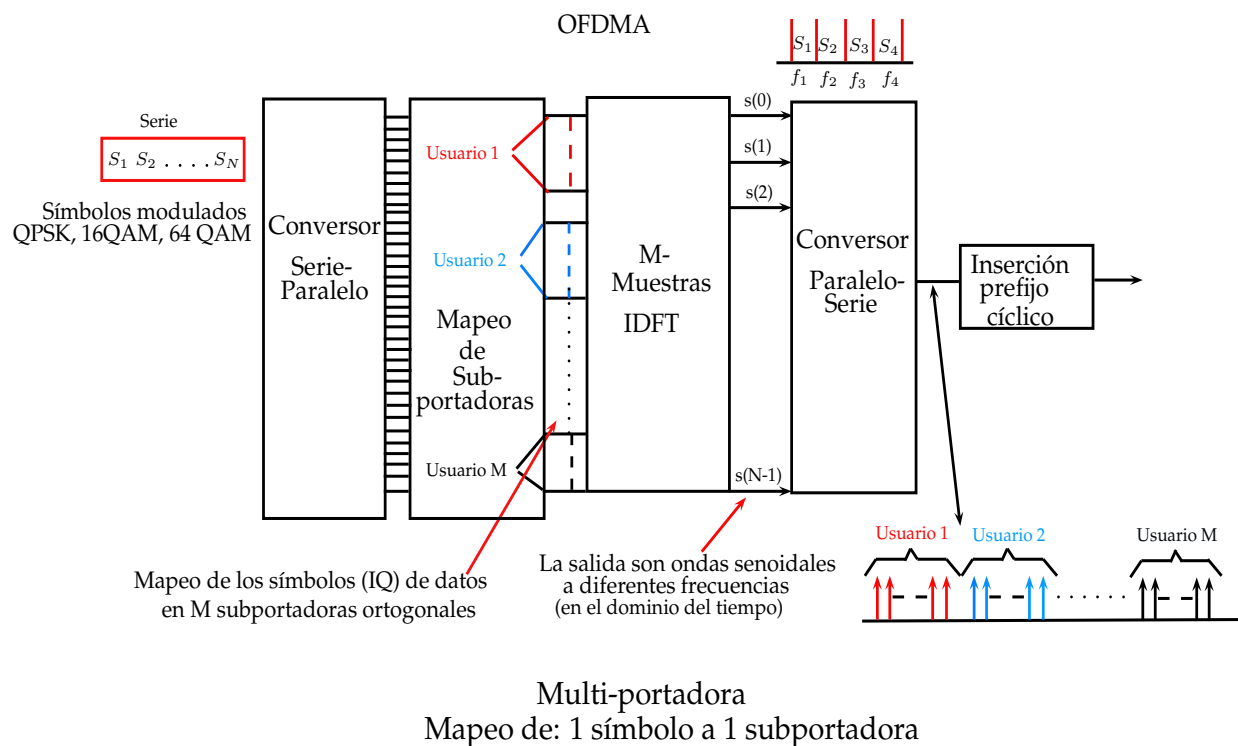


Figura 2.3: OFDMA.

La modulación OFDM tiene el inconveniente de presentar fluctuaciones muy altas en la envolvente del PAPR, dando lugar a la necesidad de amplificadores de alta linealidad y conlleva a la degradación de la calidad de servicio del enlace de comunicación [18]. Por lo tanto, OFDM no es factible en el enlace de subida de LTE, debido a que el presupuesto de potencia en el usuario móvil es limitado. Por consiguiente, el estándar 3GPP utiliza un esquema modificado fundamentado en OFDMA, el cual es conocido como SC-FDMA y se muestra en la [Figura 2.4](#).

La [Figura 2.4](#) muestra el concepto principal de la técnica del acceso múltiple SC-FDMA. Los símbolos de modulación seriales son generados mediante diferentes tipos de modulaciones, tales como QPSK, 16QAM, y 64 QAM. Después, los símbolos (que emplean una representación en cuadratura o IQ) son trasladados de forma serial a paralela con el objetivo de ser procesados por el módulo de la transformada discreta de Fourier (DFT, por sus siglas en inglés). La DFT transforma los símbolos que están en fase-cuadratura (IQ, por sus siglas en inglés) al dominio de la frecuencia con el objetivo de poder recuperar la información de las subportadoras.

El módulo del mapeo de subportadoras, asigna las subportadoras en diferentes posiciones con el objetivo de cumplir con tres tipos asignaciones: 1) acceso múltiple por división de frecuencia intercalado (IFDMA, por sus siglas en inglés), 2) acceso múltiple por división de frecuencia distribuido (DFDMA, por sus siglas en inglés) y 3) acceso múltiple por división de frecuencia localizado (LFDMA, por sus siglas en inglés).

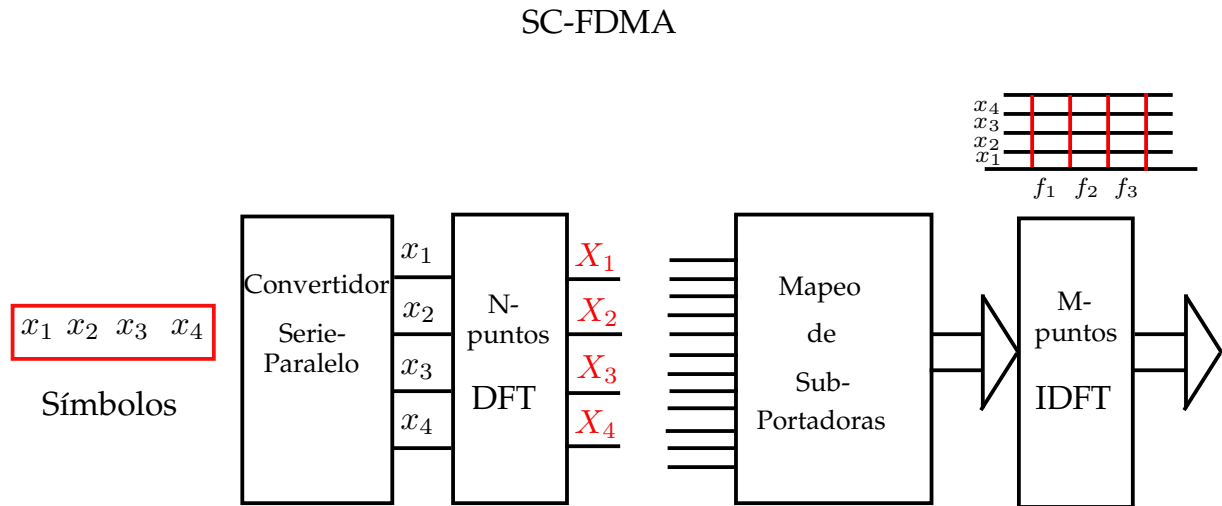
La asignación o mapeo está dado por la siguiente ecuación:

$$N = \frac{M}{Q}. \quad (2.2)$$

Donde N es el número de subportadoras asignadas al usuario, M es el número de subportadoras y Q es el número de usuarios.

La restricción del sistema SC-FDMA está enfocado en cumplir que  $M > N$ , es decir, el número de las M-subportadoras asignadas al bloque de la IDFT es estrictamente mayor al número de las N-subportadoras (salida del módulo de la DFT) asignadas al usuario. Esto significa que las entradas al módulo del IDFT que no son asignadas deben ser forzadas a cero. Debido a esto, la salida del módulo de la IDFT será una señal con propiedades analógicas a una señal de única portadora (*single-carrier*) de baja potencia en un determinado ancho de banda que depende del valor N [19].





### PORTADORA ÚNICA

1 Símbolo es transmitido sobre múltiples portadoras

Figura 2.4: SC-FDMA.

Por ejemplo, si el sistema SC-FDMA transmite símbolos en el dominio de la frecuencia para  $N = 4$ ,  $Q = 3$ , y  $M = 12$ , de acuerdo a (2.2), cada usuario obtiene 4 subportadoras. Para el caso de un usuario, las 4 subportadoras asignadas a un usuario bajo los tres diferentes tipos de mapeos (localizado, distribuido e intercalado) son mostrados en la Figura 2.5. El mapeo localizado acomoda los símbolos de forma contigua en una porción del espectro del ancho de banda total disponible [20]. El mapeo distribuido asigna posiciones de subportadoras no contiguas a los símbolos en todo el ancho de banda, además de rellenar con ceros las subportadoras no utilizadas. El mapeo intercalado es un caso especial del mapeo distribuido donde las subportadoras son ocupadas de forma equidistante uno de otro, sobre todo el ancho de banda disponible [21].

En términos de SC-FDMA las asignaciones de subportadoras se definen de la siguiente forma: acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única distribuida-intercalada (SC-FDMA-D-I, por sus siglas en inglés), acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única localizada (SC-FDMA-L, por sus siglas en inglés) y acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única distribuida (SC-FDMA-D, por sus siglas en inglés).

### 2.2.3. Asignación de recursos a nivel de suportadora

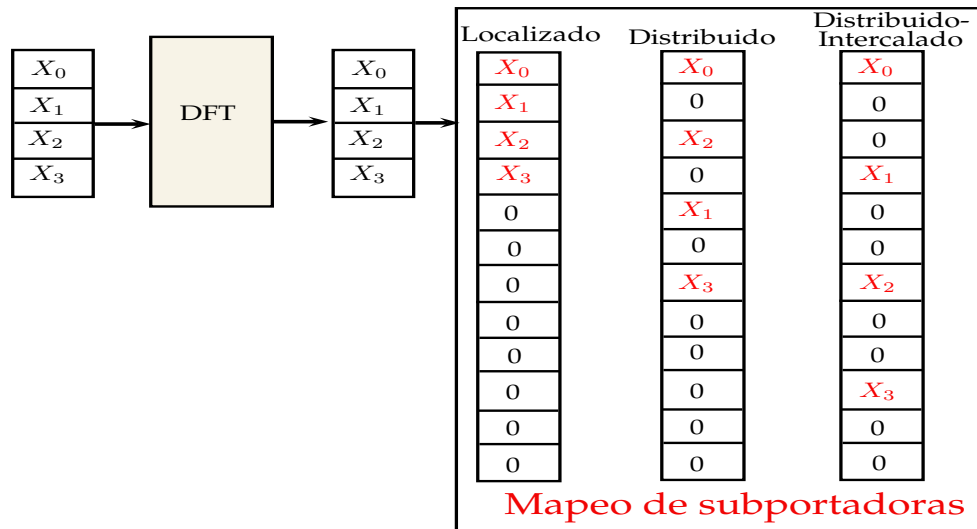


Figura 2.5: Mapeo de subportadoras.

Los esquemas SC-FDMA-L y SC-FDMA-D-I utilizan el menor y el mayor ancho de banda del mapeo de subportadoras, respectivamente. Por esta razón, es importante estudiar el comportamiento del PAPR, en ambos escenarios, cuando se utiliza toda la banda de frecuencia con la posición de las subportadoras de forma intercalada y cuando se asigna una porción de la banda de frecuencia con las subportadoras de forma adyacente.

Por otra parte, el esquema SC-FDMA-D es un caso intermedio de los otros dos esquemas como se muestra en la Figura 2.5. Por tal motivo, en esta trabajo de tesis, la asignación de subportadora SC-FDMA-D-I, SC-FDMA-L en conjunto con la técnica de acceso múltiple OFDMA han sido implementadas en Matlab. Esto con el objetivo de evaluar el consumo de potencia en la asignación de subportadoras a los usuarios a través de una simulación Monte Carlo. Las métricas de evaluación utilizadas son la función de distribución acumulativa complementaria (CCDF, por sus siglas en inglés) y el PAPR. La CCDF es la probabilidad de que el  $PAPR$  exceda un valor particular  $PAPR_0$ , el cual puede ser expresado como sigue:

$$Pr\{PAPR > PAPR_0\} = 1 - Pr(PAPR \leq PAPR_0), \quad (2.3)$$

donde el PAPR es definido de la siguiente forma:

$$PAPR = \frac{\max(|x(t)|^2)}{E[|x(t)|^2]}. \quad (2.4)$$

La notación  $x(t)$  hace referencia a las subportadoras resultantes de la modulación OFDM, es decir, a las subportadoras que salen del módulo de la IDFT en ambos esquemas de acceso múltiple, OFDMA (ver Fig. 2.3) y SC-FDMA (ver Fig. 2.4).

Los parámetros utilizados en la simulación Monte Carlo se muestran en la Tabla 2.1.

Parámetros	Valor
Número de subportadoras del sistema (M)	256
Número de subportadoras por usuario (N)	64
Modulación IQ	16 QAM
Bloques de símbolos transmitidos	$10 \times 10^5$

Tabla 2.1: Parámetros de evaluación.

Como resultado de la simulación Monte Carlo, la Figura 2.6 muestra la CCDF respecto de  $PAPR_0$ . A un valor de 0.1% de la CCDF, los valores de  $PAPR_0$  son 2.9 dB, 6.9 dB y 8.5 dB para SC-FDMA-D-I, SC-FDMA-L y OFDMA, respectivamente.

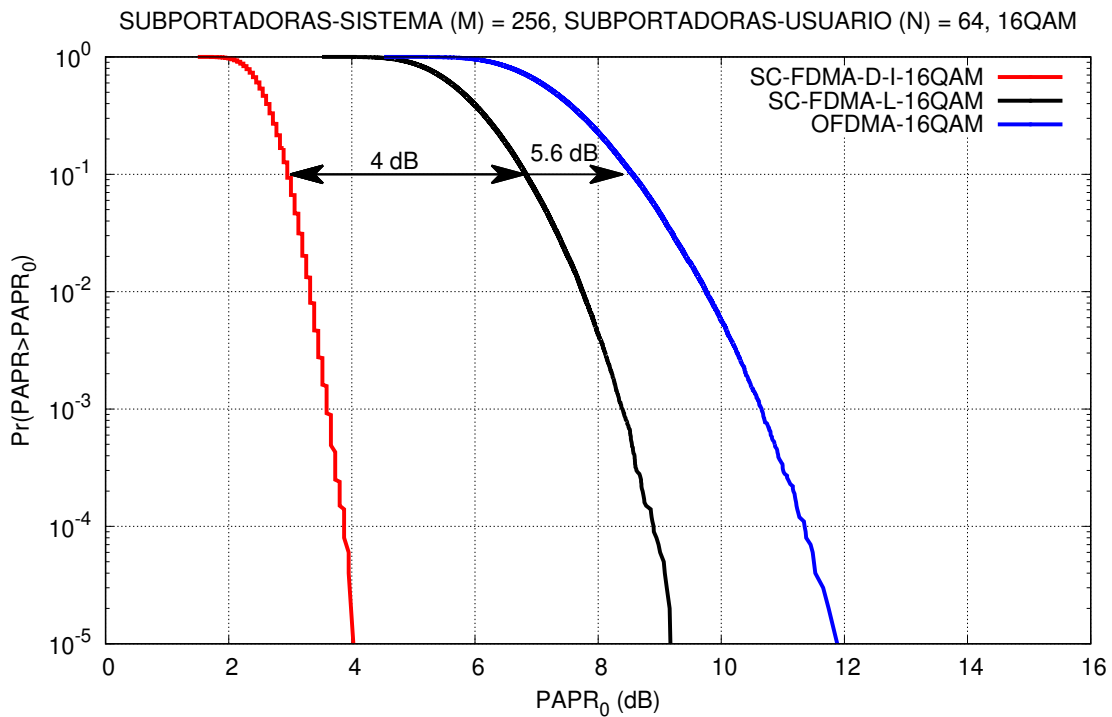


Figura 2.6: OFDMA comparado con SC-FDMA-D-I y SC-FDMA-L

Los resultados de la evaluación de asignación a nivel de subportadora individual muestran que el incremento del  $PAPR_0$  de SC-FDMA-L sobre el SC-FDMA-D-I es de 4 dB, mientras que el OFDMA presenta un incremento de  $PAPR_0$  de 5.6 dB sobre el SC-FDMA-D-I.

De acuerdo al resultado obtenido, la técnica OFDMA-16QAM presenta un incremento del consumo de potencia comparado con SC-FDMA-D-I, y SC-FDMA-L, en 5.6 dB, y 1.6 dB, respectivamente. Por esta razón, OFDMA no es considerado como esquema de acceso múltiple en el enlace de subida de LTE.

#### 2.2.4. Asignación de recursos a nivel de grupo de subportadoras

El siguiente análisis está enfocado en la asignación a nivel de grupos de subportadoras. Se asume que el grupo de subportadoras se encuentra compuesto de 12 subportadoras de forma contigua. La configuración utilizada en la evaluación es 1200/2048, considerando un 10% del ancho de banda. Esto significa que 120 subportadoras están destinadas para la asignación de recursos, donde el tamaño del radio bloque (RB, por sus siglas en inglés) está compuesto de 12 subportadoras contiguas. Finalmente, se considera la asignación de 10 RB (120 subportadoras) a un usuario de los 100 RB (1200 Subportadoras) disponibles. Para evaluar el desempeño a través de una simulación Monte Carlo, el mapeo de subportadoras y la modulación OFDM para SC-FDMA y OFDMA se modelan en la siguiente subsección.

#### 2.2.5. Modelado de la asignación de subportadoras en SC-FDMA

La asignación de recursos para SC-FDMA en términos de grupo de subportadoras se analizan, el tipo localizado y distribuido. Por lo tanto, la definición para grupo de subportadoras para el tipo localizado y distribuido son SC-FDMA-GS-L y SC-FDMA-GS-D, respectivamente.

##### Modelado de SC-FDMA-GS-L

Se considera la asignación de 10 RB a 1 usuario, por lo tanto, se tiene lo siguiente:

$$FFT_{Sc} = FFT[S_{c_1}, S_{c_2}, \dots, S_{c_{120}}], \quad (2.5)$$

donde SC, es la subportadora ya modulada en componentes IQ (QPSK, 16QAM, 64QAM). De acuerdo al sistema SC-FDMA (ver Fig. 2.4), a las subportadoras ya moduladas digitalmente, se le aplica la transformada de Fourier como en la Ecuación 2.5.

El mapeo de subportadoras de forma localizada para SC-FDMA consiste en el mapeo de los 10 RB de forma contigua, lo que implica que las primeras 120 posiciones del arreglo están ocupadas y las posiciones restantes de 121 a 2048 son rellenas con ceros, como se muestra a continuación:

$$Mapeo\_SCFDMA\_Loc = [FFT\_Sc_1(1), \dots, FFT\_Sc_{120}(120), 0(121), \dots, 0(2048)]. \quad (2.6)$$

Para obtener el SC-FDMA de única portadora, la modulación OFDM, mediante la IFFT, se aplica a las subportadoras que salen del módulo del mapeo de subportadoras, como se muestra a continuación:

$$SCFDMA\_Loc = IDFT[Mapeo\_SCFDMA\_Loc]. \quad (2.7)$$

### Modelado de SC-FDMA-GS-D

Las subportadoras de la Ecuación 2.5 son tomadas y mapeadas de tal forma que sean de forma distribuida. Los 10 RB asignados a un usuario son distribuidos en un ancho de banda de 1200 subportadoras (posición 1 a 1200). Esto significa que el primer RB está mapeado en las posiciones del 1 al 12, las siguientes 108 posiciones son rellenas con ceros, el segundo RB es mapeado en las posiciones del 121 al 132, las siguientes 108 posiciones (133 a 240) son rellenas con cero y, así, sucesivamente. Las posiciones finales, del 1201 al 2048, son puestas a cero, como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} Mapeo\_SCFDMA\_Dist = [ & FFT\_Sc_1(1), \dots, FFT\_Sc_{12}(12), 0(13), \dots, 0(120), \\ & FFT\_Sc_{13}(121), \dots, FFT\_Sc_{24}(132), 0(133), \dots, 0(240), \dots \\ & \dots, FFT\_Sc_{109}(1189), \dots, FFT\_Sc_{120}(1200), 0(1201), \dots, 0(2048)]. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Por último, la modulación OFDM es aplicada a la asignación de forma distribuida con el objetivo de obtener el SC-FDMA de única portadora, como se presenta a continuación:

$$SCFDMA\_Dist = IDFT[Mapeo\_SCFDMA\_Dist]. \quad (2.9)$$

### 2.2.6. Modelado de la asignación de subportadoras en OFDMA

La asignación de recursos para OFDMA en términos de grupo de subportadoras se analizan, el tipo localizado y distribuido. Por lo tanto, la definición para grupo de subportadoras para el tipo localizado y distribuido son OFDMA-GS-L y OFDMA-GS-D, respectivamente.

#### Modelado de OFDMA-GS-L

Aunque se aplica el mismo mapeo utilizado en la [Ecuación 2.6](#), las subportadoras moduladas digitalmente son tomadas directamente, sin pasar por un procesamiento de la transformada de Fourier (ver [Fig. 2.3](#)). Por lo tanto, la modulación OFDM es aplicada de forma directa a los símbolos IQ, como se presenta a continuación:

$$Mapeo\_OFDMA\_Loc = IDFT[SC_1(1), \dots, SC_{120}(120), 0(121), \dots, 0(2048)]. \quad (2.10)$$

#### Modelado de OFDMA-GS-D

La asignación distribuida de OFDMA, utiliza el mapeo de la [Ecuación 2.8](#), y la modulación OFDM es aplicada directamente a las subportadoras moduladas digitalmente:

$$\begin{aligned} Mapeo\_OFDMA\_Dist = IDFT[SC_1(1), \dots, SC_{12}(12), 0(13), \dots, 0(120), \dots \\ \dots, SC_{13}(121), \dots, SC_{24}(132), 0(133), \dots, 0(240), \dots \\ \dots, SC_{109}(1189), \dots, SC_{120}(1200), 0(1201), \dots, 0(2048)]. \end{aligned} \quad (2.11)$$

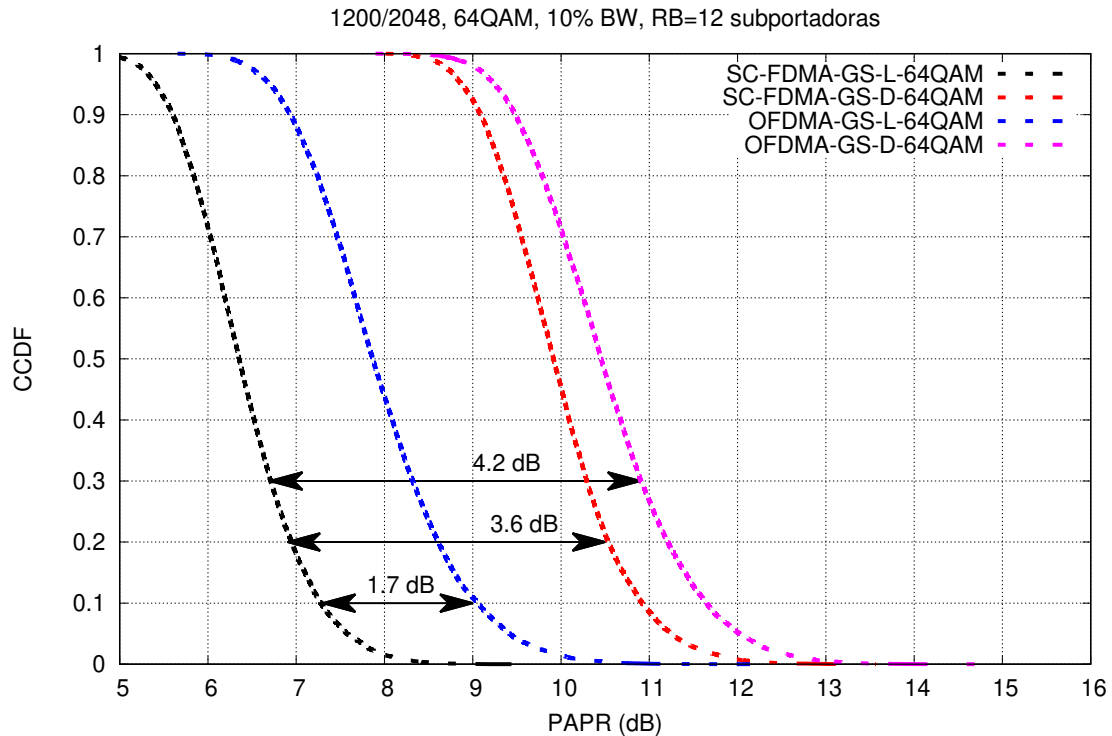
En ambas asignaciones de OFDMA (localizada y distribuida), se genera un esquema del tipo multiportadora.

Finalmente, el modelado de SC-FDMA-GS-L, SC-FDMA-GS-D, OFDMA-GS-L y OFDMA-GS-D se implementan en Matlab mediante una simulación Monte Carlo. La evaluación se lleva a cabo con tres diferentes modulaciones digitales, 64QAM, 16QAM y QPSK. Esto con el objetivo de evaluar el consumo de potencia mediante la métrica del PAPR con respecto al CCDF para cada modulación. Los resultados de la simulación son mostrados en la [subsección 2.2.7](#).

### 2.2.7. Evaluación de asignación de grupo de subportadoras en SCFDMA y OFDMA

#### Evaluación para una modulación 64QAM

La [Figura 2.7](#) muestra el CCDF respecto de PAPR para una modulación digital IQ de 64QAM. El SC-FDMA-GS-L-64QAM presenta un considerable decremento en términos de potencia de 1.7 dB (CCDF de 0.1), 3.6 dB (CCDF de 0.2) y 4.2 dB (CCDF de 0.3) comparado con los esquemas, SC-FDMA-GS-D-64QAM, OFDMA-GS-L-64QAM y OFDMA-GS-D-64QAM, respectivamente.



[Figura 2.7](#): Comparación entre OFDMA-64QAM y SC-FDMA-64QAM, para los tipos localizado y distribuido.

#### Evaluación para una modulación 16QAM

La [Figura 2.8](#) muestra el CCDF respecto de PAPR para una modulación digital IQ de 16QAM.

El SC-FDMA-GS-L-16QAM muestra un considerable decremento de consumo de potencia de 1.9 dB (CCDF de 0.1), 3.7 dB (CCDF de 0.2) y 4.3 dB (CCDF de 0.3) comparado con los esquemas SC-FDMA-GS-D-16QAM, OFDMA-GS-L-16QAM y OFDMA-GS-D-16QAM, respectivamente.

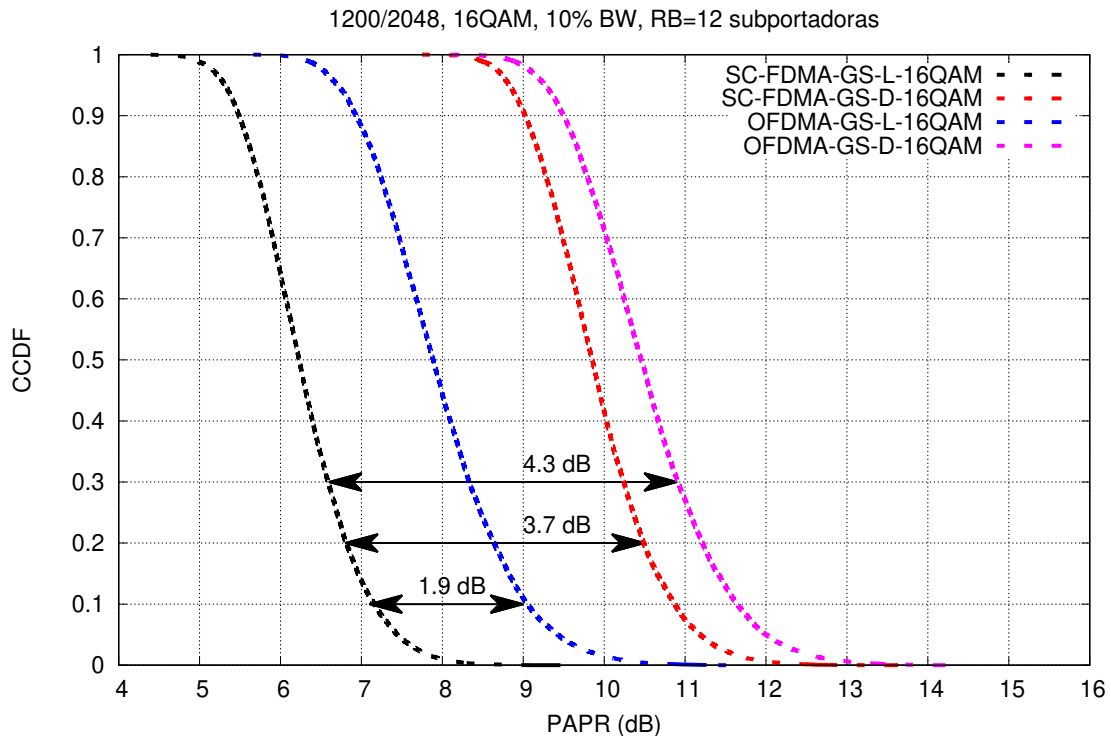


Figura 2.8: Comparación entre OFDMA-16QAM y SC-FDMA-16QAM, para los tipos localizado y distribuido.

## Evaluación para una modulación QPSK

La Figura 2.9 muestra el CCDF respecto de PAPR para una modulación digital IQ de QPSK. Los resultados muestran que el SC-FDMA-GS-L-QPSK presenta una considerable reducción en términos de potencia de 2.6 dB (CCDF de 0.1), 4 dB (CCDF de 0.2) y 5 dB (CCDF de 0.3) comparado con SC-FDMA-GS-D-QPSK, OFDMA-GS-L-QPSK y OFDMA-GS-D-QPSK, respectivamente.



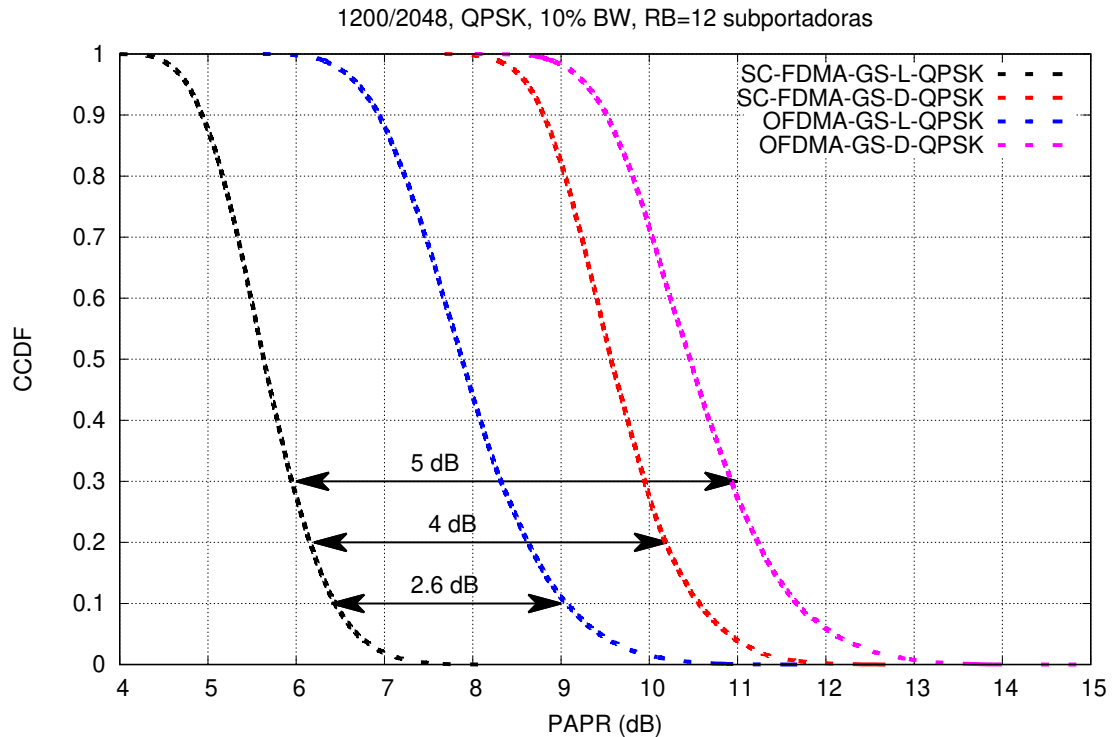


Figura 2.9: Comparación entre OFDMA-QPSK y SC-FDMA-QPSK, para los tipos localizado y distribuido.

## Análisis comparativo del PAPR en los tres tipos de modulación digital a nivel de grupo de subportadoras

Los resultados obtenidos de la evaluación del PAPR están concentrados en la [Tabla 2.2](#), para los tres tipos de modulaciones, 64QAM, 16QAM y QPSK. Se puede observar que el consumo de potencia es menor cuando se transporta la menor cantidad de bits en los recursos de radio. Además, la asignación de forma localizada SC-FDMA presenta un considerable decremento de PAPR. Por lo tanto, se puede concluir que la asignación de RB de forma contigua, bajo un esquema SC-FDMA, muestra un menor consumo de potencia en el enlace de subida de LTE.

El estudio presentado en esta sección nos permite afirmar que tipo de asignación de recursos y esquema de acceso múltiple consume menor potencia. Esta información es crucial para el diseño e implementación de los calendarizadores de LTE del enlace de subida. Dado que la optimización del consumo potencia es un factor importante para el usuario móvil.

	SC-FDMA-GS-D-64QAM	OFDMA-GS-L-64QAM	OFDMA-GS-D-64QAM
SC-FDMA-GS-L-64QAM	1.7 dB	3.6 dB	4.2 dB
	SC-FDMA-GS-D-16QAM	OFDMA-GS-L-16QAM	OFDMA-GS-D-16QAM
SC-FDMA-GS-L-16QAM	1.9 dB	3.7 dB	4.3 dB
	SC-FDMA-GS-D-QPSK	OFDMA-GS-L-QPSK	OFDMA-GS-D-QPSK
SC-FDMA-GS-L-QPSK	2.6 dB	4 dB	5 dB

Tabla 2.2: Tabla comparativa de consumo de potencia a nivel de grupo de subportadoras.

Con el objetivo de identificar la diferencia entre el esquema de acceso múltiple del enlace de subida y de bajada de LTE, se muestra la Figura 2.10. La principal diferencia entre los dos esquemas de acceso múltiple, OFDMA y SC-FDMA es el módulo DFT de M-puntos y IDFT de M-puntos (bloques con letras rojas), respectivamente.

El módulo DFT recibe los símbolos complejos en su forma IQ y los convierte al dominio de la frecuencia, para enviarlos al bloque de mapeo de subportadoras, donde las subportadoras son agrupadas de forma localizada o distribuida, como se mostró en la Figura 2.5.

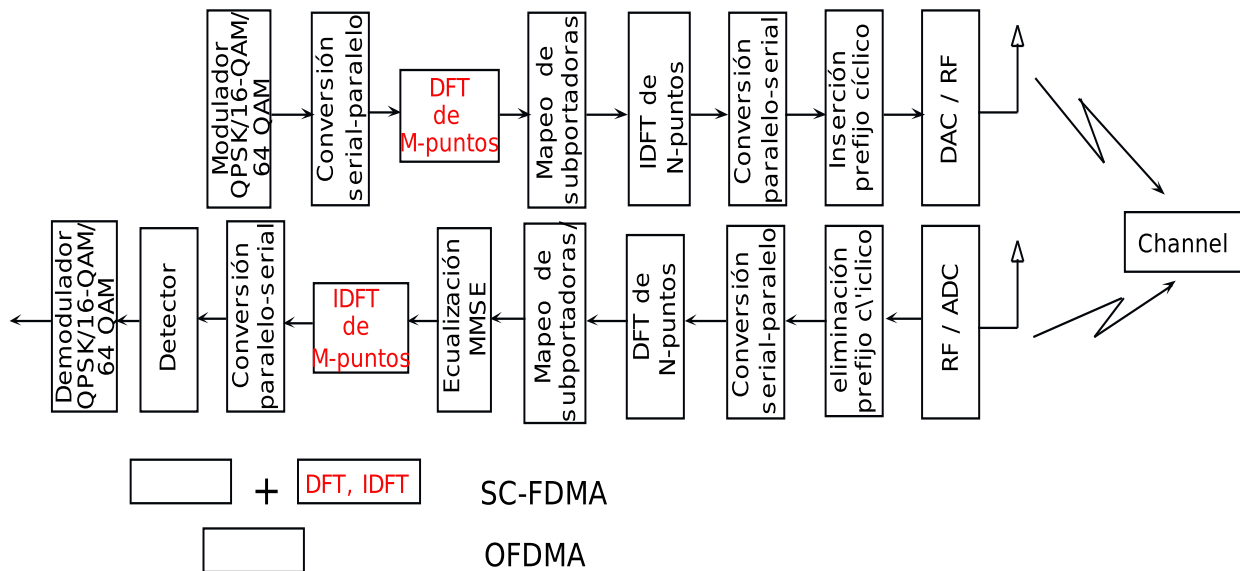
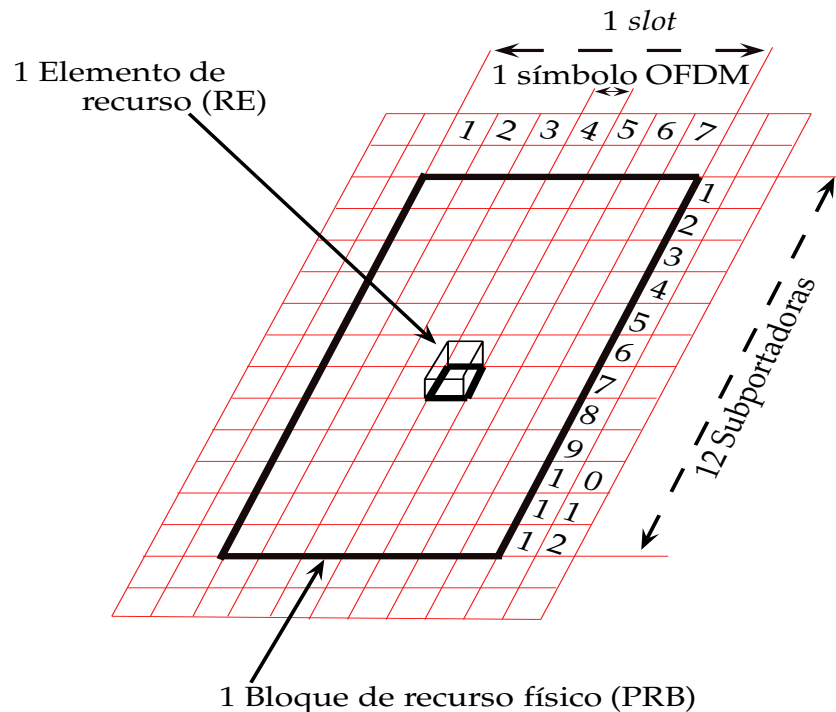


Figura 2.10: Esquema del transmisor y receptor de SC-FDMA y OFDMA.

### 2.2.8. Bloque de recurso (RB)

En algunos artículos el RB es conocido como bloque de recurso físico (PRB, por sus siglas en inglés). En este trabajo de tesis utilizamos el término RB como bloque de recurso.

El RB está definido mediante 12 subportadoras adyacentes en el dominio de la frecuencia y cada suportadora tiene un valor de 15 kHz, mientras que en el dominio del tiempo, una sola ranura está compuesta de 6 o 7 símbolos OFDM [55], [14], [15]. El elemento mínimo de recurso se le conoce elemento de recurso (RE, por sus siglas en inglés) como se muestra en [Figura 2.11](#).



[Figura 2.11](#): Bloque de recurso.

En el contexto de calendarización de paquetes, las decisiones de asignación de recursos se realizan de forma periódica cada 1 ms (TTI), por consiguiente, la asignación siempre se realiza en pares de RB [16], de tal forma, que en el dominio de la frecuencia cumpla con 180 kHz (debido a que el ancho de cada subportadora es 15 kHz) y en el dominio del tiempo con 1 ms (2 ranuras). La [Figura 2.12](#) muestra la red de recursos en dos dimensiones, el dominio del tiempo (horizontal) y el dominio de la frecuencia (vertical).

La red es fragmentada por el sistema LTE con base en el ancho de banda dinámico. Por ejemplo, de la [Tabla 2.3](#), se observa que 6 RB (72 subportadoras) le corresponden a un ancho de banda de 1.4 MHz en una ranura. Por ejemplo, 6 RB se pueden repartir entre los usuarios que se encuentran bajo la cobertura del eNB y a través de los RB asignados, los usuarios pueden transmitir sus datos. El calendarizador del enlace de subida de LTE asigna recursos a los usuarios por cada uno de los TTI. Por tal motivo, la asignación mínima de recursos a un usuario es de un par de RB, 2 ranuras (1 TTI) en el dominio del tiempo y 12 subportadoras en el dominio de la frecuencia. Por otra parte, el número total de subportadoras está dado por  $N_{RB}^{UL} \times N_{SC}^{RB}$ , que define el número de RB y el número subportadoras, respectivamente.

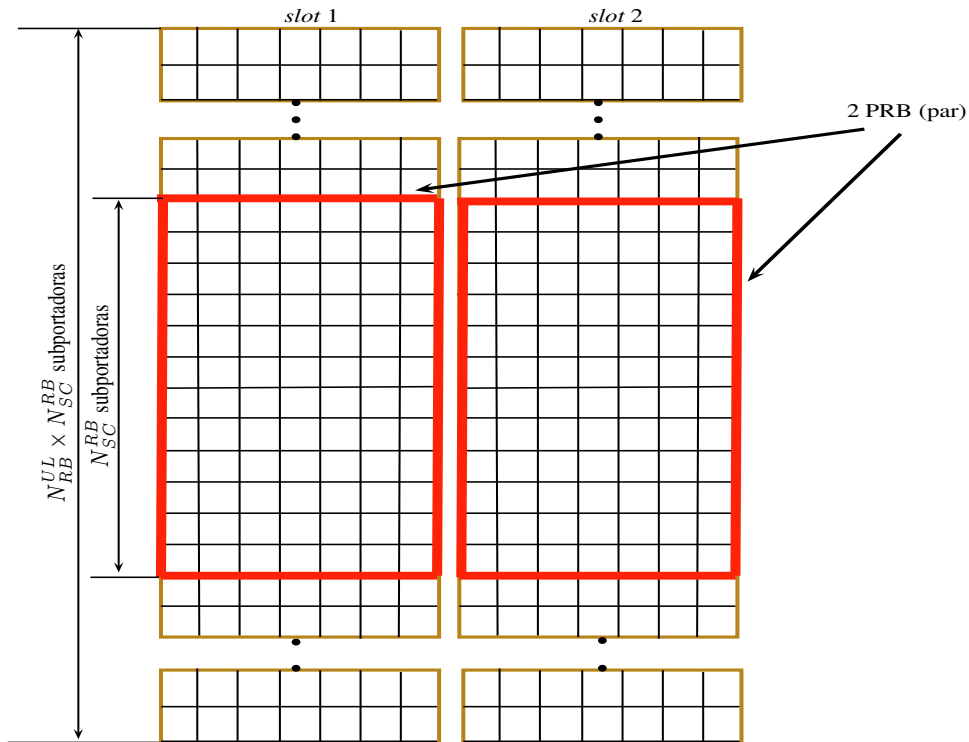


Figura 2.12: Red de recursos.

Ancho de Banda	1.4 MHz	3 MHz	5MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Número de PRB	6	15	25	50	75	100
Número de suportadoras	72	180	300	600	900	1200

Tabla 2.3: Parámetros de ancho de banda del sistema LTE.

## 2.3. Algoritmos de calendarización de enlace de subida

### 2.3.1. Calendarización de paquetes (PS)

En la literatura se encuentran dos tipos de calendarizadores de paquetes [22]:

1. **Calendarizador dependiente del canal (CDS)**. Asigna recursos a los usuarios que experimentan una buena calidad de canal para maximizar el rendimiento del sistema LTE.
2. **Calendarizador estático**. Asigna recursos a los usuarios de forma equitativa y no toma en cuenta la calidad de canal. Por tal motivo, la métrica del algoritmo maximiza la justicia (equidad), pero decrementa el rendimiento del sistema LTE.

El algoritmo de calendarización se encuentra en la capa MAC del eNB y tiene un gran impacto en el desempeño de la red celular de LTE. La función principal del calendarizador está enfocado en administrar y asignar los recursos de radio limitado al equipo de usuario (UE, por sus siglas en inglés). El calendarizador de paquetes (PS, por sus siglas del inglés) debe incluir dos estados muy importantes, la calendarización en el dominio del tiempo y de la frecuencia, como se muestra en la [Figura 2.13](#).

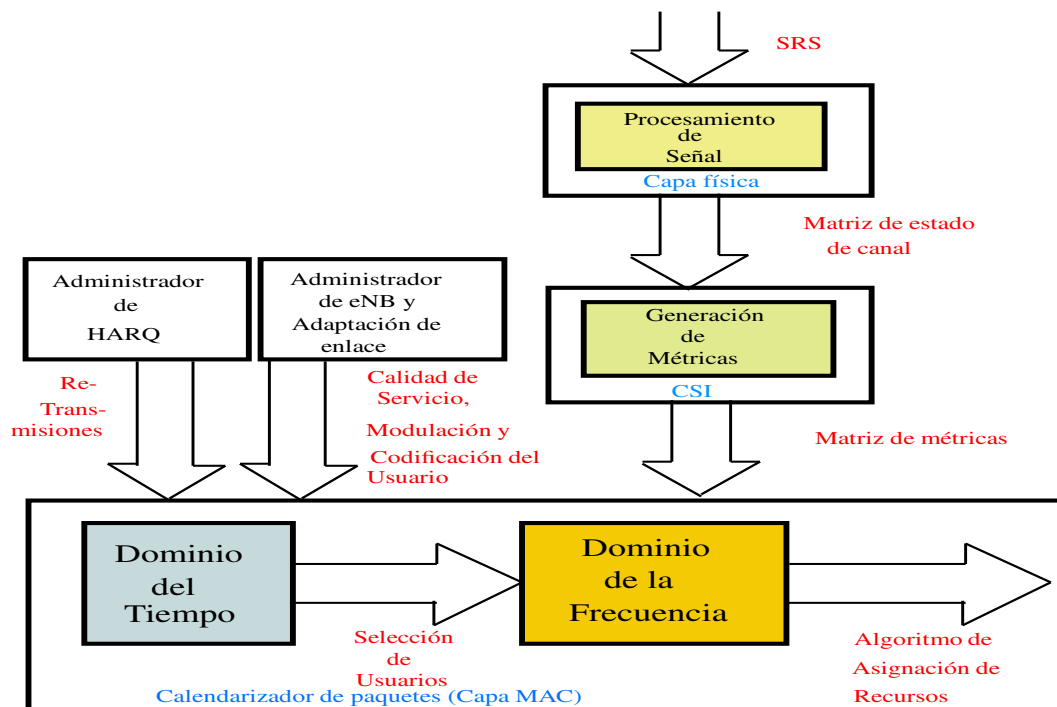


Figura 2.13: Módulos de la calendarización en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

- **Calendarización en el dominio del tiempo (TD)**

Tiene las siguientes funciones:

- Agrupar a los usuarios con base en la prioridad del usuario y la calidad de servicio requerido por el usuario.
- Gestiona la retransmisión de paquetes mediante la información proporcionada por el administrador de solicitud de repetición automática híbrida (HARQ, por sus siglas en inglés).
- Obtiene los esquemas de modulación y codificación soportados por el usuario mediante la información proporcionada por la adaptación de enlace [22].
- Finalmente, la calendarización en el dominio del tiempo selecciona a los usuarios que serán transferidos a la etapa de la asignación de recursos en el dominio de la frecuencia.

- **Calendarización en el dominio de la frecuencia (FD)**

En esta etapa, se asignan los recursos de radio a los usuarios, a nivel de subportadora o grupo de subportadoras (RB). Aquí, es posible utilizar diversos tipos de algoritmos y heurísticas de optimización para la asignación de recursos, tales como algoritmos heurísticos, algoritmos bajo la técnica de inteligencia de enjambres, algoritmos evolutivos, etc. Por ejemplo, si la métrica está fundamentada en asignar recursos al usuario que presenta mejor calidad de canal en cada una de sus subportadoras, el algoritmo debe iniciar la búsqueda de la mejor combinación UE-RB que maximice la métrica seleccionada y, así, mejorar el rendimiento del sistema LTE.

Este trabajo de tesis aborda la asignación de recursos de radio mediante RB en el enlace de subida de LTE. Por esta razón, este trabajo se enfoca en la etapa de calendarización en el dominio de la frecuencia. Específicamente, en los algoritmos de asignación de recursos del enlace de subida de LTE. Además, es importante remarcar que SC-FDMA ha sido seleccionado por el estándar 3GPP para el enlace de subida de LTE [23] y, por consiguiente, la asignación de RB a un usuario debe ser de forma contigua, restricción que debe tomarse en cuenta en el diseño del algoritmo.

Por otra parte, el estándar 3GPP no define el diseño de los algoritmos de calendarización, lo que significa que el diseño y la implementación de estos es a criterio de los ingenieros de diseño y fabricantes de las estaciones base [22], [16]. Por esta razón, existe una gran necesidad de proporcionar algoritmos de asignación de subportadoras que funcionen de forma eficiente para el enlace de subida de LTE.

La asignación de recursos se vuelve más complicada conforme se incrementa el número de usuarios en la red, dando origen a nuevos desafíos en el diseño y en la implementación de los algoritmos de asignación de recursos [23].

Dado que nuestro estudio está enfocado en los algoritmos de asignación de recursos en el dominio de la frecuencia de la [Figura 2.13](#), se puede observar que el algoritmo de asignación requiere de dos parámetros de entrada: 1) usuarios candidatos a calendarizar (TD) y 2) matriz de métricas derivada de la matriz de estado del canal. La matriz de estado del canal se obtiene a partir de las señales de referencia de sondeo (SRS, por sus siglas en inglés) que transmiten los UE al eNB. Estas señales permiten al eNB estimar la calidad de canal de las subportadoras de cada usuario. En el capítulo siguiente se describe el proceso para obtener la matriz de estado del canal.

### 2.3.2. Predicción de canal para adaptar el enlace

Para nuestro caso de estudio, la estimación de canal tiene dos funciones importantes:

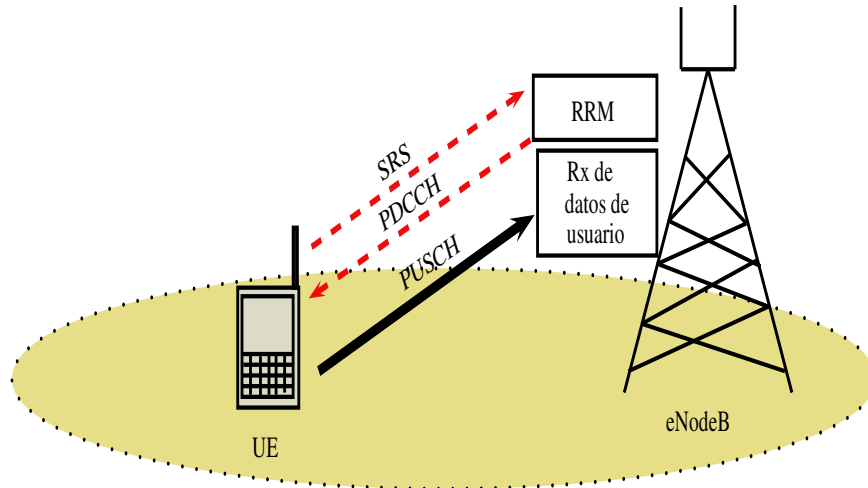
- **Adaptación de enlace (LA).** El proceso que permite asignar el esquema de codificación y modulación (MCS, por sus siglas en inglés) a los RB asignados a un UE con base en la calidad de canal.
- **Generación de la matriz del estado del canal.** Está formada por la medición de la calidad de canal de las subportadoras de cada usuario.

El parámetro que permite estimar la calidad de canal (subportadoras) es el cociente potencia de la señal sobre interferencia más ruido (SINR, por sus siglas en inglés).

Para efectos de nuestro estudio, nos enfocamos en el enlace de subida de la tecnología LTE.

Por tal motivo, a continuación se describe el proceso de asignación de recursos a nivel de capa física.

En primera instancia, se asume que el usuario está conectado al eNB y el envío de SRS es realizado por el UE y, una vez que son recibidas de forma exitosa por el eNB, este último realiza una evaluación de la calidad del canal, como se muestra en la [Figura 2.14](#).



[Figura 2.14](#): Proceso de envío de SRS y adaptación del enlace.

Las SRS han sido recibidas por el bloque de gestión de recursos de radio (RRM, por sus siglas del inglés) en el eNB, el cual tiene por objetivo administrar de forma eficiente los recursos de radio de la celda.

El bloque RRM cumple con las siguientes funciones:

- Control de admisión de radio.
- Control de servicios portadores.
- Asginación de recursos.
- Adaptación de enlace.
- Coordinación de interferencia inter-celda.
- Control de movilidad.
- Balanceo de carga.



- Control de potencia.
- Recepción discontinua.

Nosotros nos centraremos solamente en dos funciones del RRM: la adaptación de enlace y la asignación de recursos.

### 2.3.3. Adaptación de enlace mediante el procesamiento de las SRS

La función principal de la adaptación de enlace (LA, por sus siglas en inglés), es la asignación apropiada de la tasa de la codificación e índice de modulación al UE [24] en el enlace de subida de LTE. Por lo tanto, la LA debe satisfacer un criterio de evaluación bajo la tasa de error de bloque (BLER, por sus siglas en inglés) [25] del enlace. En la mayoría de los simuladores a nivel de enlace de LTE se toma el criterio del 10%.

La estimación de canal en el enlace de subida está enfocada en la transmisión de señales físicas (SRS), las cuales permiten al eNB proporcionar información del estado del canal (CSI, por sus siglas en inglés) sobre un rango de frecuencias del sistema LTE.

La estimación apropiada del CSI, en conjunto con el algoritmo de asignación de recursos, permiten al calendarizador interno del eNB asignar recursos a los usuarios de forma adecuada [26].

Por otra parte, el parámetro o métrica SINR es utilizado en la toma de decisiones de la asignación del índice del indicador de calidad del canal (CQI, por sus siglas en inglés) y de recursos a los usuarios. Para obtener el SINR, las SRS pasan por el RRM a través de diferentes módulos de procesamiento de señal de la capa física del eNB (ver [Figura 2.15](#)). El procesamiento de las SRS, mediante los diferentes módulos de la capa física de LTE, permiten crear los dos parámetros de entrada para la calendarización de asignación de recursos en el dominio de la frecuencia: 1) La creación de la matriz de estado del canal, sustentado en el SINR de las suportadoras de cada usuario, y 2) La obtención del CQI, mediante el MCS con base en el SINR estimado.

La [Figura 2.15](#) muestra el proceso que se lleva a cabo para obtener la adaptación del enlace.

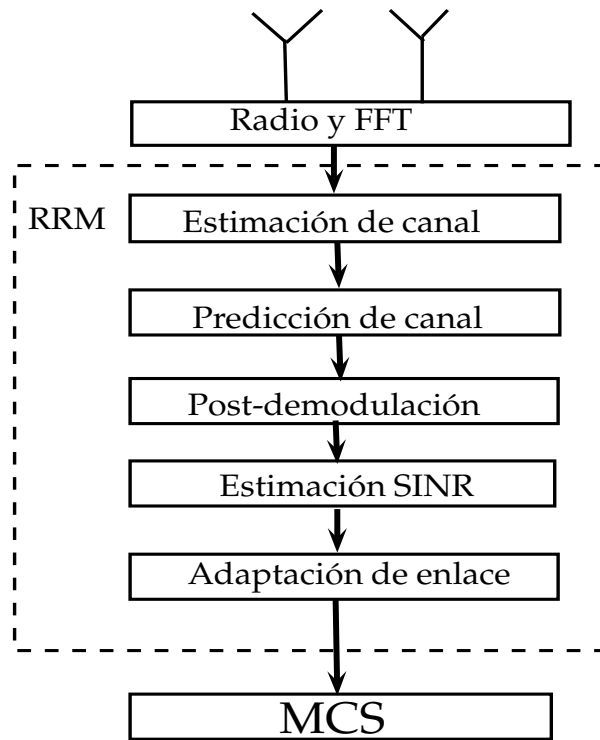


Figura 2.15: Módulos de capa física del módulo RRM [27].

- **El bloque de Radio y FFT.** Cuando las SRS llegan a este módulo, el prefijo cíclico es removido y son transformadas al dominio de la frecuencia mediante el bloque FFT.
- **Estimación de canal.** En este módulo se realiza la estimación del canal, típicamente a través de las técnicas de mínimos cuadrados (LS, por sus siglas en inglés) o mínimo error cuadrático medio (MMSE, por sus siglas en inglés).
- **Predicción de canal.** Esta etapa trata de corregir el error en frecuencia a través de un predictor de canal óptimo. El error en frecuencia no compensado se debe al canal variante en el tiempo, entre el eNB y el usuario. Un ejemplo de este fenómeno se da cuando el usuario está en movimiento y la estación base se encuentra fija [27].
- **Canal de post-demodulación.** Esta etapa realiza un proceso de igualamiento (*Equalizer*), para compensar las distorsiones introducidos por el canal, a través de diversas técnicas [28].

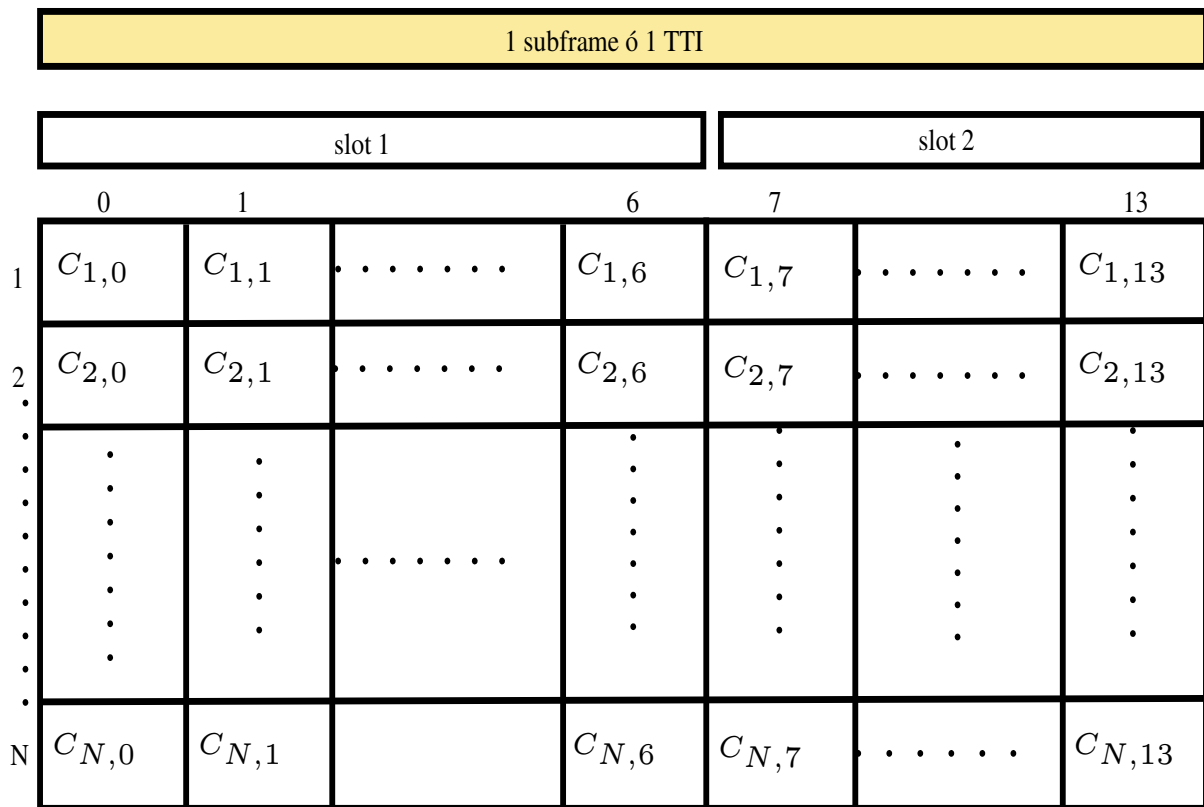
- **Estimación de SINR.** En esta etapa, el SINR de las suportadoras del usuario se promedian con el objetivo de obtener un SINR efectivo. Los algoritmos que se utilizan para obtener el SINR efectivo son: el mapeo de SINR efectivo exponencial (EESM, por sus siglas en inglés) y el mapeo de SINR exponencial con base en información mutua (MIESM, por sus siglas en inglés). Por otra parte, el SINR efectivo permite: 1) obtener el CQI, para asignar el MCS correspondiente a los RB ya asignados a los usuarios, y 2) crear los RB, para construir la matriz de estado del canal.
- **Adaptación de enlace.** En esta etapa, se realiza el mapeo del SINR efectivo con el CQI. Esto permite definir la cantidad de bits a transmitir en cada RB y, además, establece la velocidad de codificación del usuario. También, es importante mencionar que el sistema LTE debe asegurar un valor del BLER, a lo más, del 10 % [29]. En [30], la [Tabla 2.4](#) de mapeo SINR-CQI cumple con el criterio del 10 % del BLER, en un canal ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN, por sus siglas en inglés).

Rango de SINR (dB)	CQI	Modulación	Tasa de codificación	Bits/REs
-7.0 → -5.0	1	QPSK	0.0761	0.1523
-5.0 → -3.0	2	QPSK	0.1172	0.2344
-3.0 → -1.0	3	QPSK	0.1884	0.3770
-1.0 → +1.0	4	QPSK	0.3008	0.6016
+1.0 → +3.0	5	QPSK	0.4384	0.8770
+3.0 → +5.0	6	QPSK	0.5879	1.1758
+5.0 → +7.0	7	16QAM	0.3691	1.4766
+7.0 → +8.5	8	16QAM	0.4785	1.9141
+8.5 → +10.0	9	16QAM	0.6015	2.4063
+10.0 → +11.5	10	64QAM	0.4550	2.7305
+11.5 → +13.5	11	64QAM	0.5537	3.3223
+13.5 → +15.0	12	64QAM	0.6504	3.9023
+15.0 → +17.0	13	64QAM	0.7539	4.5234
+17.0 → +19.5	14	64QAM	0.8525	5.1152
> +19.5 →	15	64QAM	0.9258	5.5546

[Tabla 2.4](#): Mapeo de SINR a CQI [30].

### 2.3.4. Generación de la matriz de estado del canal

Las señales físicas SRS permiten al eNB obtener información sobre la calidad de canal de cada una de las subportadoras del usuario. El número de subportadoras depende del ancho de banda del sistema utilizado, como se muestra en la [Tabla 2.3](#). Por consiguiente, todas estas mediciones se guardan en una matriz de estado del canal. El tamaño de la matriz de un usuario es  $N$  subportadoras (frecuencia)  $\times$  14 símbolos (tiempo); el tamaño en el dominio del tiempo es equivalente a un TTI, como se muestra en la [Figura 2.16](#). Por ejemplo, si en un momento dado existen 7 usuarios bajo la cobertura del eNB solicitando recursos, se deben generar 7 matrices de estado del canal de este tipo. Los parámetros  $C$  y  $N$  en la matriz, indican la calidad de la subportadora y el número de las subportadoras, respectivamente.



[Figura 2.16](#): Medición de la calidad de canal por subportadora en el TTI de un usuario.

## Generación de RB

Los RB de un usuario son generados a través de la matriz de estado del canal. El procedimiento que lleva a cabo es el siguiente:

- Obtiene el promedio por renglones de la matriz de estado del canal, dando como resultado una columna de **Promedio**  $R_N$ , donde N es el número de subportadoras que depende del ancho de banda seleccionado.
- La columna **Promedio**  $R_N$  se divide en grupos de 12 (Promedio  $R_1$ , Promedio  $R_2, \dots$ , Promedio  $R_{12}$ ). Por ejemplo, si el BW seleccionado es de 10 MHz equivale a 600 subportadoras (Tabla 2.3), por lo tanto, el número de grupos resultantes es de 50 (cada grupo contiene 12 suportadoras).
- A cada grupo de 12 promedios se les aplica la ecualización en el dominio de la frecuencia, con el objetivo de eliminar la interferencia intersimbólica [31] mediante la Ecuación 2.12, [32]:

$$F = \frac{H^*(k)}{H(k)H^*(k) + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_x^2}}, \quad (2.12)$$

donde  $\mathbf{F}$  es la ecualización del canal,  $\mathbf{H}$  es la respuesta en frecuencia del canal,  $\sigma_n^2$  la potencia de ruido de las subportadoras y  $\sigma_x^2$  la potencia de la señal de las subportadoras.

- Se aplica la post-demodulación a cada grupo de 12 promedios (libres de interferencia intersimbólica) mediante la Ecuación 2.13 [33], [34]. Obteniendo como resultado el SINR-SCFDMA de cada grupo:

$$\begin{aligned} SINR^{SC-FDMA} &= \\ &= \frac{\frac{\sigma_x^2}{N_{SC}} |diag(\mathbf{FH})|^2}{\sigma_x^2 \|\mathbf{FH}\|^2 - \frac{\sigma_x^2}{N_{SC}} |diag(\mathbf{FH})|^2 + \mathbf{F}^T \mathbf{F} + (\sigma_n^2) \|diag(\mathbf{F})\|^2}, \end{aligned} \quad (2.13)$$

donde  $N_{SC}$  es el número de subportadoras.

En la Ecuación 2.13, el numerador proporciona la ganancia del canal experimentado por el usuario tomando en cuenta la ecualización del canal y el denominador refleja todas las interferencias causadas por otras transmisiones.

- Una vez aplicada la post-demodulación a cada grupo, el SINR efectivo de cada grupo es obtenido mediante la [Ecuación 2.14](#) o [2.15](#) [24], según sea el caso:

$$SINR_{eff} = EESM(SINR, \beta) = -\beta \ln \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{-\frac{SINR_i}{\beta}} \right), \quad (2.14)$$

donde  $\beta$ , se ajusta empíricamente por cada modulación;

$$SINR_{eff} = MIESM(SINR, I) = I^{-1} \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(SINR_i) \right). \quad (2.15)$$

$I$ , es la función de capacidad del alfabeto de la modulación aplicada y  $SINR_i = SINR^{SC-FDMA}$ .

- El SINR efectivo es el último procesamiento de señal aplicado a cada grupo de 12 promedios. Es importante remarcar que un grupo de 12 promedios, con todo el procesamiento de señal aplicado, da origen a un RB.

Todo el proceso, para obtener los RB, puede observarse en la [Figura 2.17](#).

La [Figura 2.17](#), muestra el proceso para generar los RB de un usuario. Para el caso de  $l$ -usuarios, bajo la cobertura de un eNB, la matriz de estado del canal se expande:  $l$ -columnas debido al número de usuarios y  $k$ - renglones, debido al número de RB, como se muestra en la [Figura 2.18](#).

El parámetro  $S_{k \times l}$ , es el resultado de todo el procesamiento de las subportadoras para generar los RB de cada usuario.

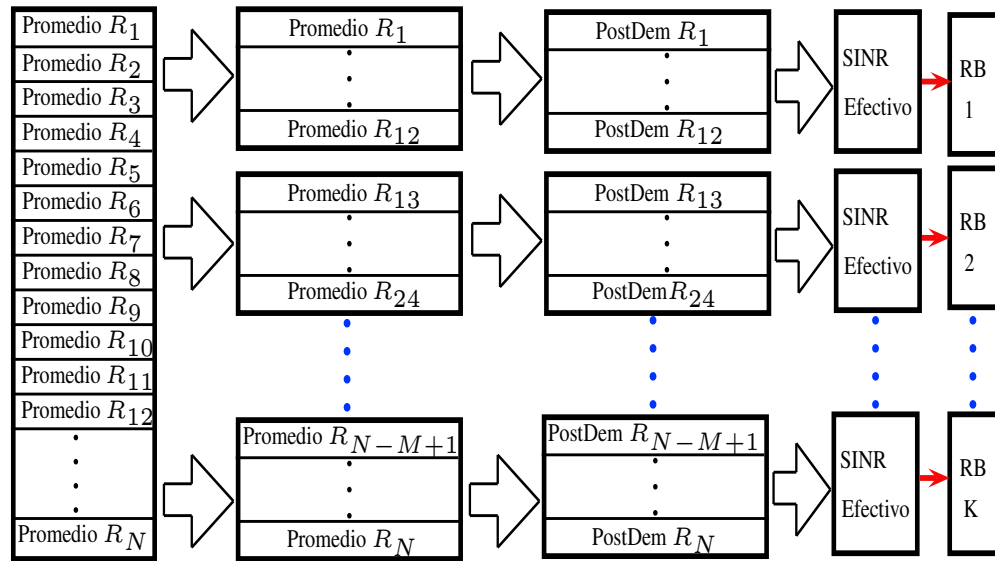


Figura 2.17: Obtención de los RB de un UE.

RBs	Usuarios				$UE_l$
	$UE_1$	$UE_2$	$UE_3$	$UE_4$	
$RB_1$	$S_{1,1}$	$S_{1,2}$	$S_{1,3}$	$S_{1,4}$	$S_{1,l}$
$RB_2$	$S_{2,1}$	$S_{2,2}$	$S_{2,3}$	$S_{2,4}$	$S_{2,l}$
$RB_3$	$S_{3,1}$	$S_{3,2}$	$S_{3,3}$	$S_{3,4}$	$S_{3,l}$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$RB_k$	$S_{k,1}$	$S_{k,2}$	$S_{k,3}$	$S_{k,4}$	$S_{k,l}$

Figura 2.18: Matriz de estado del canal para  $l$ -usuarios.

En este Capítulo se analizaron los siguientes aspectos:

En la [subsección 2.2.4](#) se analizó la asignación de recursos a nivel de grupos de subportadoras en SC-FDMA y OFDMA, ambos en su forma distribuida y localizada con la finalidad de analizar el tipo de asignación que proporciona un menor consumo de potencia.

Además, en la [subsección 2.2.5](#) se analizó el modelado a nivel de capa física de LTE con el objetivo de evaluar el consumo de potencia mediante una simulación Monte Carlo en Matlab.

En la [subsección 2.2.7](#) se demostró que la asignación de recursos para SC-FDMA en su variante localizada (asignación contigua de RB al usuario) consume menor potencia para el enlace de subida de LTE. Los resultados de la evaluación del modelado a través de una simulación Monte Carlo, muestran el consumo de potencia mediante la métrica de evaluación PAPR. Por lo tanto, en la [Gráfica 2.7](#), [Gráfica 2.8](#) y [Gráfica 2.9](#) se demostró el menor consumo de potencia en la asignación de forma localizada, para las modulaciones 64QAM, 16QAM y QPSK, respectivamente.



# Capítulo 3

## Estado del arte de los algoritmos de asignación de recursos de LTE

### 3.1. Introducción

Los algoritmos de asignación de recursos en el dominio de la frecuencia y del tiempo de la tecnología evolución a largo plazo (LTE, por sus siglas en inglés) no son definidos por el estándar tercer proyecto de asociación de generación (3GPP, por sus siglas en inglés) de LTE. 3GPP permite a los fabricantes de las estaciones base de LTE desarrollar sus propios algoritmos de calendarización. Por esta razón, los calendarizadores son un tópico de investigación abordado por la comunidad de investigadores y de la industria y, por consiguiente, existe un estudio amplio sobre los algoritmos de calendarización para el sistema LTE. Debido a esto muchos de los estudios presentados en la literatura especializada están enfocados en los algoritmos del enlace de bajada de LTE. Sin embargo, existen diferencias muy claras y restricciones muy específicas para diseñar e implementar calendarizadores para el enlace de subida de LTE. Por ejemplo, para evitar un mayor consumo de potencia del usuario móvil, el algoritmo de asignación de recursos en el dominio de la frecuencia debe realizar una asignación contigua de los bloques de recursos (RB, por sus siglas en inglés) al usuario, lo que da origen a un problema de optimización de polinomio no determinístico complejo (NP-HARD, por sus siglas en inglés) dentro del algoritmo. Esto significa que la solución del algoritmo no puede ser verificada en tiempo polinomial.

Por otra parte, el algoritmo de asignación de recursos para establecer su métrica de asignación debe conocer la calidad de canal de las subportadoras del usuario móvil. Esto conlleva, a la necesidad de trabajar conjuntamente con otros módulos de procesamiento de señales existentes en la estación base, tales como la asignación del índice del indicador de calidad de canal (CQI, por sus siglas en inglés) y la adaptación de enlace.

La implementación de algoritmos de asignación de recursos con baja complejidad computacional es fundamental en escenarios vehicular-infraestructura (donde el vehículo envía mensajes a la estación base) con canales altamente dispersivos. Esto con el objetivo de evitar grandes latencias en el envío y recepción de mensajes entre el vehículo y la estación base. Por lo tanto, resulta conveniente implementar algoritmos heurísticos de baja complejidad computacional.

Entonces, es importante realizar un estudio exhaustivo de la literatura sobre los algoritmos de calendarización para el enlace de subida de LTE. Además, es necesario identificar los algoritmos que tomen en cuenta la asignación del CQI, adaptación de enlace y evaluaciones de desempeño sobre entornos de fluctuaciones rápidas a diferentes velocidades.

Otro aspecto relevante está relacionado con la búsqueda de un simulador a nivel de enlace, que cumpla con el estándar de LTE, que sea exclusivamente para el enlace de subida de LTE y, además, con licencia libre y de investigación que permita modelar la adaptación de enlace con base en la estimación de canal de la subportadoras del usuario móvil.

Este capítulo aborda la literatura especializada de los algoritmos de asignación de recursos para el enlace de subida de LTE. También, presenta un estudio comparativo de la revisión y análisis de la literatura.

Por otra parte, el capítulo aborda un estudio de los simuladores de LTE existentes en el campo de investigación de LTE. También, se comparan las principales características que se requiere analizar de los simuladores encontrados. Finalmente, se presenta un estudio de la adaptación de enlace, del simulador LTE Vienna, para el enlace de subida de LTE.

## 3.2. Algoritmos de asignación de recursos del enlace de subida de LTE

### 3.2.1. Literatura especializada

La literatura revisada en este trabajo de tesis está fundamentada en investigaciones que han sido presentadas en distintas revistas científicas y conferencias especializadas del área.

En [7], evalúan tres tipos de calendarizadores en un escenario V2I (vehicular-infraestructura):

1. El esquema de calendarización *Round-Robin* (RR, por sus siglas en inglés). Asigna los recursos en el dominio del tiempo y de la frecuencia a los vehículos de forma equitativa sin tomar en cuenta la calidad del canal.

2. Esquema de calendarización dependiente del canal (CDS, por sus siglas en inglés). Asigna los recursos en el dominio de la frecuencia a los vehículos a través de la información del estado del canal. Este tipo de algoritmo toma como métrica principal el máximo rendimiento (*throughput*).

3. Esquema de calendarización fundamentado en colas (QBS, por sus siglas en inglés). Este considera la información del estado de la cola. El esquema QBS siempre selecciona el vehículo con la longitud de cola más grande.

En el artículo [7], los autores muestran que el esquema CDS presenta mejor desempeño en comparación con los otros calendarizadores. A partir de este estudio, el estado del arte de este trabajo de tesis se enfoca en algoritmos de asignación de recursos dependiente o soportado por el canal de comunicación, el cual tiene por objetivo la optimización del rendimiento (*throughput*).

La principal tarea de los algoritmos de asignación de recursos consiste en la búsqueda de la mejor combinación RB-UE que optimiza el rendimiento del sistema. Por consiguiente, la búsqueda de la mejor combinación da lugar a un problema de optimización *NP hard*. Esto nos motivó a enfocar el trabajo de investigación en el estudio de algoritmos del tipo heurístico que facilitan la implementación práctica en sistemas reales de LTE. En la literatura revisada se han encontrado dos líneas de investigación: 1) algoritmos de asignación de recursos para el acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única (SC-FDMA, por sus siglas en inglés) y 2) algoritmos de calendarización de enlace de subida de LTE.

La primera línea de investigación se enfoca en la asignación de recursos sustentado en el esquema de acceso múltiple SC-FDMA, algunos de estos trabajos consideran la asignación de forma localizada (contigüidad en la asignación de RB) y ninguno toma en cuenta la adaptación de enlace (modulación adaptiva) que requiere el sistema 3GPP LTE. Además, no presentan un número definido de subportadoras para la creación de un RB.

La segunda línea de investigación se enfoca en la asignación de recursos en LTE, es decir, ya toma en cuenta más parámetros de LTE, tales como ancho de banda, la creación de un RB a través de promedios de 12 subportadoras adyacentes y la asignación de recursos en cada TTI. En algunos de estos trabajos se considera la asignación de forma localizada y muy pocos toman en cuenta la adaptación de enlace.

Por otra parte, los trabajos de investigación referidos a SC-FDMA toman como métrica a maximizar, la capacidad del canal (formula de Shannon). Sin embargo, *el incremento de la capacidad del canal, no significa un incremento en el rendimiento del sistema LTE*, los autores en [30] remarcan esta aseveración, debido a que algunos trabajos presentados en la literatura especializada no toman en cuenta la adaptación de enlace de LTE.

En [23], los autores presentan un estudio comparativo de los algoritmos de asignación de recursos para SC-FDMA. La clasificación es la siguiente:

1. **Optimización de rendimiento.** En esta categoría se encuentran los algoritmos que asignan subportadoras a los usuarios con base en la maximización de la tasa de transmisión total del sistema.

2. **Justicia.** En esta categoría, los algoritmos comparten de forma equitativa los recursos de radio a los usuarios.

3. **Satisfacción de los requerimientos de calidad de servicio de los usuarios.** En este grupo, los algoritmos satisfacen las demandas de calidad de servicio por los usuarios a través de la asignación de recursos de radio.

Los artículos clasificados, de acuerdo a su taxonomía, son mostrados en la [Tabla 3.1](#).

En [16], los autores presentan un estudio comparativo, tutorial y evaluación de calendarizadores de enlace de subida de LTE para clasificar a los calendarizadores en tres categorías:

1. **Calendarizadores del mejor esfuerzo (*Best-Effort*).** Esta categoría tiene el objetivo de maximizar las métricas, rendimiento y justicia del sistema.

2. **Calendarizadores enfocados en la calidad de servicio (QoS).** Esta categoría tiene la consigna de dar prioridad a los usuarios con base en un criterio diferente de calidad de servicio.

3. **Calendarizadores enfocados en la optimización de energía.** Esta categoría reduce el consumo de potencia de los usuarios móviles, hasta un punto en que el usuario aún mantiene sus requisitos de calidad de servicio.

Rendimiento	Justicia (equidad)	QoS de los UEs
Algoritmo <i>greedy</i> (GA) [40]	Utilidad marginal de asignación de RB <i>greedy</i> (GRBAMU) [31]	Algoritmo de retardo [50]
Algoritmo de matriz (MA) [41]	Primera expansión máxima (FME) [35]	Algoritmo de retardo de PF [50]
Algoritmo basado en árbol de búsqueda (STBA) [41]	Expansión máxima recursiva (RME) [35]	máxima expansión modificada <i>Gale-Shapley</i> [51]
Algoritmo con restricción de adyacencia (GA-AR) [42]	Diferencia mínima de área con respecto a la envolvente ( $MAD^E$ ) [35]	Algoritmo de maximización de tasa de suma ponderada [52]
Algoritmo sustentado en ganancia potencial (PGA) [43]	Algoritmo gradiente localizado heurístico (HLGA) [47]	Algoritmo de asignación de RB <i>Greedy</i> mejorado (EGRBAA) [53]
Algoritmo fundamentado en desempeño de RB (RBPA) [44]	Portadora a portadora sucesiva (CCT) [48]	Asignación de RB eficiente y oportunista con QoS (QoS OEA) [54]
Asignación de RB de BW de Tx adaptiva (ATBRBAA) [45]	Asignación del primer RB con métrica más grande (LMVRBFA) [48]	Asignación de RB en entornos móviles heterogéneo (RBAAHMME) [55]
Algoritmo de asignación de RB de 2 niveles (TTRBAA) [46]	<i>Riding Peaks Algorithm</i> (RPA) [48]	
	Expansión máxima recursiva mejorada (IRME) [49]	

Tabla 3.1: Algoritmos de asignación de recursos para SC-FDMA multiusuario [23].

Los autores en [16] presentan una evaluación de desempeño de los siguientes algoritmos:

1. Expansión máxima recursiva (RME, por sus siglas en inglés) [35]. Es un algoritmo dependiente del canal.
2. RR. Este algoritmo asigna los recursos de radio de forma equitativa entre los usuarios sin tomar en cuenta la calidad del canal del usuario.
3. *Greedy*. Este algoritmo asigna los RB mediante la maximización de la utilidad marginal.
4. Justicia proporcional con tasa de bit garantizado (PFGBR, por sus siglas en inglés) [36]. Este algoritmo tiene la capacidad de clasificar a los usuarios con prestaciones de calidad de servicio y a los usuarios que no cuentan con dichas prestaciones.
5. Algoritmo de calendarización de multiportadora (MC-SA, por sus siglas en inglés) [37]. El algoritmo asigna uno o más RB a un usuario con base en la relación del rendimiento experimentado por los usuarios y su tasa de bit garantizado (GBR, por sus siglas en inglés).
6. Ancho de banda de transmisión adaptiva con tasa de bit garantizado (GBR-ATB, por sus siglas en inglés) [38]. El algoritmo adapta la calidad de servicio al usuario mediante la función del rendimiento promedio normalizado de los usuarios y su GBR.
7. Potencia total mínimo para la asignación de recursos (BMTP, por sus siglas en inglés) [39]. El diseño de este algoritmo está enfocado en la programación entera binaria. El algoritmo cumple con la restricción de contigüidad en SC-FDMA, el cual crea una matriz con todos los posibles patrones de asignación. Finalmente, el algoritmo calcula la asignación de potencia necesaria para cada patrón de asignación posible.

De la comparación de los algoritmos antes mencionados. El algoritmo heurístico RME dependiente del canal presenta el mejor rendimiento y la menor justicia en comparación con los otros algoritmos analizados. Además, como resultado de la evaluación de desempeño destacan los siguientes resultados:

- Un pequeño número de usuarios con ligera carga de tráfico conduce a la utilización insuficiente de los recursos asignados y, por consecuencia, un desperdicio de recursos de radio.

- Usuarios muy cercanos a la frontera de la celda experimentan mala calidad de canal, que da origen a una pobre eficiencia espectral debido al bajo esquema de modulación y codificación (MCS, por sus siglas del inglés) que utilizan para transmitir. Por tal motivo, el tamaño del bloque de transporte (TB, por sus siglas en inglés) tiende a ser más pequeño, hasta un punto que la cabecera incrementa significativamente en comparación con el espacio disponible para la carga de datos. Por esta razón, existen pérdidas de paquetes.
- Usuarios cercanos al nodo B mejorado (eNB, por sus siglas en inglés) experimentan buena calidad de canal debido a que utilizan un alto MCS para transmitir, lo cual reduce el impacto de la sobrecarga del TB. Por tal motivo, experimentan menores retardos y bajas pérdidas de paquetes.
- El calendarizador de enlace de subida en el eNB no distingue los diferentes tipos de tráfico de un equipo de usuario (UE, por sus siglas en inglés).

En [40], los autores analizan dos esquemas de asignación de subportadoras, del tipo localizado (SC-FDMA-L) e intercalado (SC-FDMA-I). Los algoritmos son heurísticos y dependientes del canal con un diseño que considera las restricciones de la técnica de acceso múltiple SC-FDMA. Además, los algoritmos son implementados bajo la condición de optimización de maximización de la tasa de datos del sistema. Los resultados de la evaluación de los dos esquemas comparado con la técnica RR, presentan un incremento del 130 % y 40 % para SC-FDMA-L e SC-FDMA-D, respectivamente. Sin embargo, los autores no consideran la agrupación de subportadoras que indica el estándar LTE para un RB; 12 subportadoras contiguas en el dominio de la frecuencia y 6 o 7 símbolos en el dominio del tiempo.

En [41], se proponen dos algoritmos de asignación de recursos, matriz de métricas (MM, por sus siglas en inglés) y el árbol de búsqueda (STBA, por sus siglas en inglés). El algoritmo MM se encarga de buscar el par UE-RC (porción de recursos) con el valor de métrica más alto y, así, concretar la asignación de la porción de recursos (RC, por sus siglas en inglés) al UE correspondiente. El RC, estrictamente está conformado por un conjunto de RB consecutivos, lo que conduce, a una degradación en la diversidad de la asignación de los RB al usuario.

El algoritmo STBA consiste en un árbol binario de búsqueda formado por las métricas de la matriz UE-RC. La mejor asignación del recurso corresponde a la rama que presenta la suma de métrica más alta. Sin embargo, al incrementar el número de UE a calendarizar las combinaciones incrementan considerablemente.

En [43] se propone un algoritmo que asigna recursos a los UE mediante la diferencia de la ganancia de canal del usuario sobre un RB en específico. El algoritmo utiliza porciones de bloques de recursos (CRB, por sus siglas en inglés) para cumplir con el criterio de adyacencia de los RB. Además, el algoritmo utiliza una política de selección llamada “ganancia de potencial”, el cual se refiere a la diferencia entre la mejor ganancia de canal del CRB y la segunda mejor ganancia de CRB y, así, sucesivamente. Sin embargo, no hay diversidad de asignación de los RB debido a que utiliza CRB (conjunto de RB adyacentes) en la asignación de recursos.

En [44], el algoritmo asigna los recursos a través de grupos (*chunks*) de subportadoras adyacentes y toma como objetivo de maximización la capacidad de SC-FDMA sin utilizar la operación  $\log$ . La capacidad alcanzable de un *chunk* está enfocada en los ecualizadores del dominio de la frecuencia, mínimo error cuadrático medio (MMSE, por sus siglas en inglés) y forzado a cero (ZF, por sus siglas en inglés) de las Ecuaciones 3.1 y 3.2, respectivamente:

$$\text{Max } R_{MMSE}^u = N_k \log_2 \left( N_k \left( \sum_{n \in A_u} \frac{1}{p_e q_{n,u} + 1} \right)^{-1} \right), \quad (3.1)$$

con la restricción de  $p_e \geq 0 \quad \forall \quad n \in A_u$  y  $\sum_{n \in A_u} p_e \leq P_u$ ,

$$\text{Max } R_{ZF}^u = N_k \log_2 \left( 1 + N_k \left( \sum_{n \in A_u} \frac{1}{p_e q_{n,u}} \right)^{-1} \right), \quad (3.2)$$

con la restricción de  $p_e \geq 0 \quad \forall \quad n \in A_u$  y  $\sum_{n \in A_u} p_e \leq P_u$ .

Dado que la operación  $\log$  no es utilizada, el parámetro más interno de las Ecuaciones (3.1), (3.2) determina los valores de la calidad de canal de los *chunks*, los cuales son almacenados en una tabla. Finalmente, con base en los valores de la tabla, el algoritmo asigna recursos al par UE-*chunk* que presenta la mejor calidad de canal.



En [45], los autores proponen un algoritmo que se adapta a la envolvente de las métricas de los usuarios. El algoritmo asigna un *chunk* al usuario que presente el pico más alto entre todas las envolventes de los usuarios en la celda. Una vez asignado el *chunk* al usuario correspondiente, el algoritmo expande su asignación sobre todo el ancho de banda, si y solo si, el valor métrica es alto, como ese muestra en la Figura 3.1.

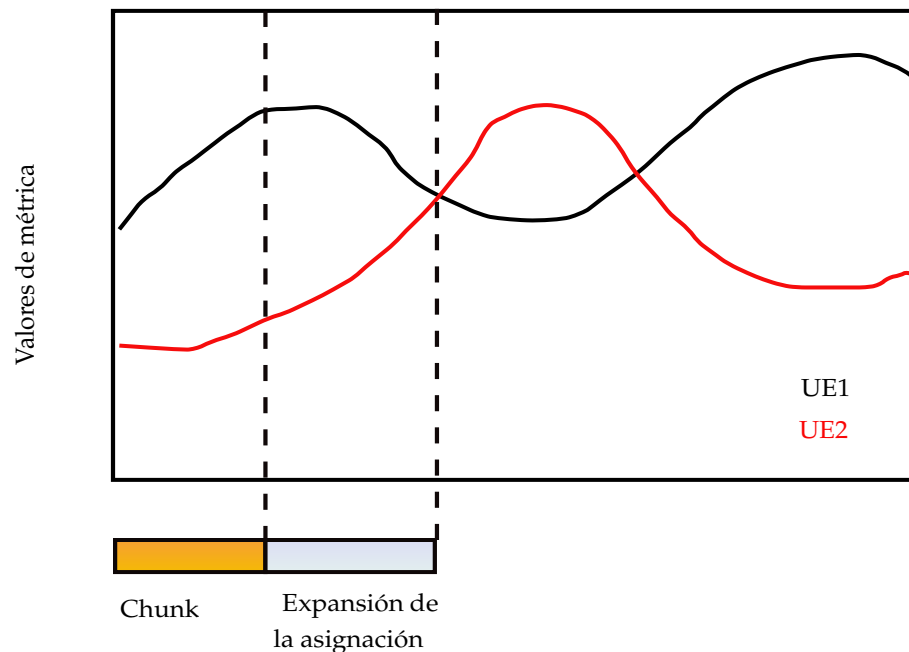


Figura 3.1: Asignación del ancho de banda de transmisión adaptivo.

Los artículos [41], [43], [44], [45] presentan algoritmos heurísticos para SC-FDMA. Estos artículos se enfocan en la asignación contigua de los RB y la asignación del recurso al usuario con mayor métrica de optimización. Sin embargo, los autores utilizan *chunks* de RB de tamaño fijo, lo que implica asignar recursos a usuarios que experimentan desvanecimiento profundos dentro de la ráfaga de un *chunk* de RB. Esta asignación a usuarios con mala calidad de canal, conduce a una degradación considerable del rendimiento del sistema, además del desperdicio continuo de recursos de radio.

En [46], los autores introducen el concepto *capacidad de RB*, el cual se refiere a la cantidad total de bits de datos que transporta un RB. Además, proponen el diseño del CDS inteligente, tomando en cuenta dos restricciones: 1) la asignación de RB de forma contigua al UE y 2) el mismo MCS en todos los RB que le fueron asignados a un UE.

Los autores proponen una segunda restricción sustentada en el *modo de MCS robusto*. Esto significa que la asignación del MCS a los RB de un usuario toman la *capacidad de RB más baja en su asignación de RB*.

La idea de su propuesta se muestra en la [Figura 3.2](#) mediante la comparación de la técnica CDS regular y la técnica CDS inteligente (propuesto por los autores).

Por ejemplo, la suma de rendimiento para el caso del CDS regular es:  $2(12) + 2(6) = 36$ , donde 12 RB (RB3-RB14) son asignados al UE1 y 6 RB (RB15-RB20) al UE2, ambos con un valor de capacidad de 2, mientras que para el CDS inteligente la suma del rendimiento es de:  $3(9) + 2(8) = 43$ , donde 9 RB (RB4-RB12) son asignados al UE1 y 8 RB (RB13-RB20) al UE2, con valor de capacidad de 2 y 3, respectivamente. De acuerdo al análisis de rendimiento, el CDS inteligente presenta un mejor desempeño.

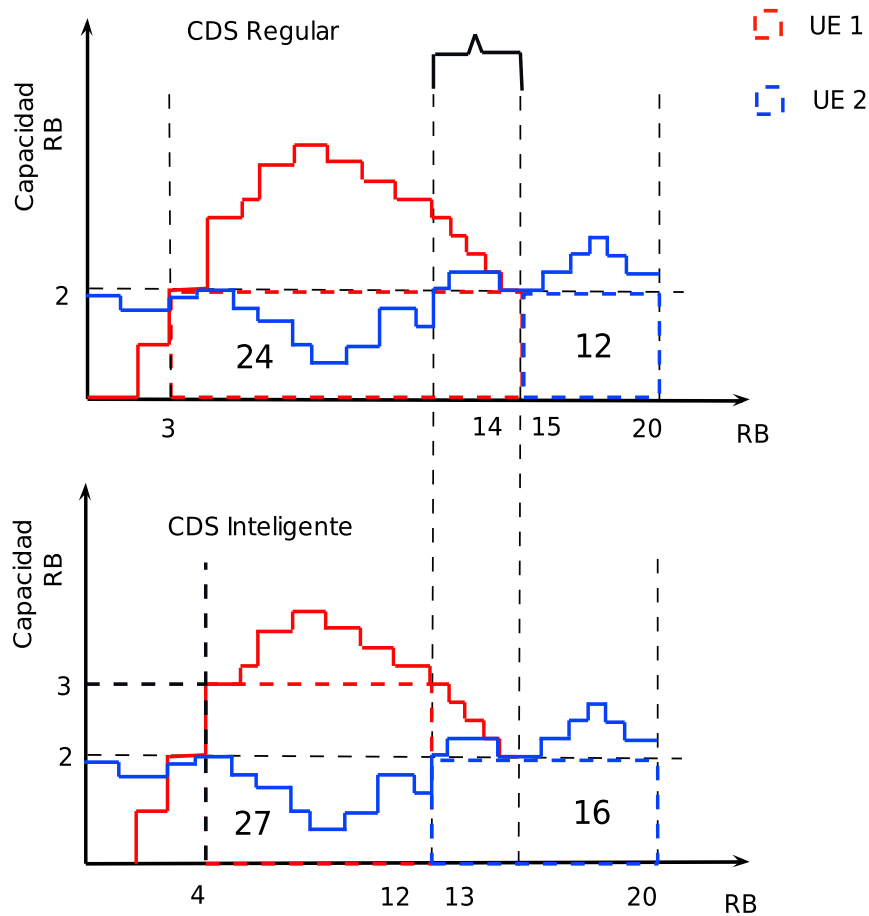


Figura 3.2: CDS regular respecto a el CDS inteligente [46].

El CDS inteligente muestra una mejora en el rendimiento debido a que la asignación de recursos para el UE1 es del RB4 hasta el RB12, lo que implica una mayor capacidad en comparación con el CDS regular y, para el UE2, la asignación de recursos es del RB13 hasta el RB20, el cual mantiene la misma capacidad en comparación con el CDS regular. Esto significa que el CDS inteligente incrementa el rango de asignación de RB al usuario.

La utilización de la misma capacidad en todos los RB asignados a un UE cambia la forma de asignar los recursos de radio a los UE en el enlace de subida de LTE. Con base en esta restricción, los autores analizan el algoritmo de asignación de dos barras (TBA, por sus siglas en inglés) y proponen dos algoritmos heurísticos: 1) el algoritmo de asignación de recursos de un nivel (STRA, por sus siglas en inglés) y 2) el algoritmo de asignación de recursos de dos niveles (TTRA, por sus siglas en inglés).

El algoritmo TBA considera dos restricciones: 1) asignación contigua de los RB al usuario y 2) el modo de MCS robusto. El objetivo de este algoritmo es maximizar el desempeño a través de la suma del rendimiento (*throughput*) del sistema. La idea principal de este algoritmo se encuentra fundamentada en la asignación de RB mediante un rectángulo de RB que está limitado por dos barras, inicial y final. Sin embargo, el problema de maximización de la suma del rendimiento es mapeado a un problema de maximización de suma de áreas de rectángulos de RB, lo cual da origen a un algoritmo de complejidad *NP-HARD*.

El algoritmo TTRA consiste de dos etapas, la primera etapa consiste en asignar los RB al UE que tiene el valor más alto del cociente potencia de la señal sobre la potencia de ruido (SNR, por sus siglas en inglés) considerando la restricción de contigüidad en la asignación de RB. Por otra parte, el algoritmo detiene la asignación cuando ya no existen RB. Otro caso, si existen más RB por asignar y todos los UE participantes ya han obtenido recursos; el algoritmo se encarga de asignar de forma contigua los RB sobrantes a los UE ya calendarizados, dando paso a la segunda etapa del calendarizador. La segunda etapa consiste en formar rectángulos con los UE ya asignados de forma adyacente, los cuales están limitados por dos barras (inicial y final); en donde la barra inicial o barra final se desplaza a la derecha o a la izquierda (de forma dinámica) en forma de rectángulo por unidad de RB mientras que las otras barras permanecen de forma estática y en cada desplazamiento el calendarizador calcula el parámetro beneficio del sistema determinado por la [Ecuación 3.3](#) :

$$beneficio\_sistema = suma\_rendimiento\_actualizado - suma\_rendimiento\_inicial, \quad (3.3)$$

donde *suma\_rendimiento\_actualizado* es la suma de rendimiento actualizado, obtenido mediante el desplazamiento de la barra y la *suma\_rendimiento\_inicial* es la suma de rendimiento inicial obtenida en la primera etapa del calendarizador.

Cuando el algoritmo TTRA localiza el mejor beneficio del sistema (realizando las combinaciones necesarias y evitando que los rectángulos se traslapen) efectúa la asignación de RB y se detiene hasta que ya no existan RB para asignar. Por esta razón, el TTRA tiene un mejor desempeño en comparación con un CDS regular, sin embargo presenta un tiempo considerable en la ejecución de sus dos niveles.

El algoritmo STRA decrementa la complejidad a través de la asignación de RB contiguos y la maximización de la suma de rendimiento simultáneamente (en una sola etapa). El procedimiento del STRA es el siguiente:

1. Buscar a los UE con el valor máximo de SNR, y al  $UE_i$  que tenga el valor máximo entre todos los encontrados se le asigna el primer  $RB_j$  (elimina el RB asignado) y, después, calcula la suma de rendimiento actual ( $\rho_i$ ).
2. Nuevamente realiza la búsqueda por columnas de los UE con valor máximo de SNR, a los cuales asigna un RB temporalmente y con esta nueva información, el algoritmo calcula la suma de rendimiento actualizado ( $\bar{\rho}_i$ ).
3. Calcula el *beneficio de usuario* ( $\Delta\rho_i$ ) definido por la [Ecuación 3.4](#):

$$\Delta\rho_i = \bar{\rho}_i - \rho_i. \quad (3.4)$$

4. Si  $\Delta\rho_i > 0$  y  $k = \text{arg}_i[\max_{i \in N}(\Delta\rho_i)]$  donde  $N = \text{UE no calendarizados}$ . El algoritmo asigna permanentemente el  $RB_k$  al  $UE_k$  y actualiza los límites de la asignación  $x_k^s(t)$  (inicial) o  $x_k^f(t)$  (final). Finalmente, el algoritmo elimina el RB del conjunto de RB disponibles y si no existe más beneficio para el usuario, el algoritmo finaliza.
5. En el caso que un  $UE_i$  no ha sido calendarizado y, además, si  $RB_{x_i^s(t)-1}$  y  $RB_{x_i^f(t)+1}$  ya no están disponibles, el  $UE_i$  se toma como ya calendarizado debido a que no se puede asignar RB discontinuos a los UE. Finalmente, si ya no existen RB disponibles y todos los UE están calendarizados, el algoritmo finaliza la asignación. Otro caso, el algoritmo regresa al paso 1.

Los autores evalúan los algoritmos propuestos TTA y STRA mostrando un mismo desempeño, mientras que el TBA presentó un mejor desempeño pero con una mayor complejidad computacional. Sin embargo, la evaluación fue sobre una cantidad reducida de 10 usuarios y, por consiguiente, no es posible determinar el máximo rendimiento de una celda real de LTE. Además, el MCS utilizado para calcular la capacidad en los RB asignados a los usuarios no cumple con el 10 % de la tasa de error de bloque (BLER, por sus siglas en inglés) que requiere el sistema LTE.

En [30], se propone un algoritmo de asignación para LTE con múltiple entrada múltiple salida (MIMO, por sus siglas en inglés). La asignación de los recursos de radio al usuario está enfocado en la maximización del rendimiento de forma global del sistema LTE. Los autores presentan un modelo analítico general del cociente potencia de la señal sobre interferencia más ruido (SINR, por sus siglas en inglés) para un escenario MIMO obtenido de la salida del equalizador del receptor (dominio de la frecuencia). El máximo rendimiento de cada usuario es el resultado del mapeo SINR-CQI de la capa de transmisión considerando los bloques de recursos asignados al usuario. Sin embargo, reescriben el problema de asignación de recursos como un problema de particionamiento definido por la [Ecuación 3.5](#):

$$\begin{aligned} \max_x \quad & \mathbf{T}^\dagger \mathbf{x} \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{1}, \end{aligned} \tag{3.5}$$

donde  $\mathbf{T}$ , es un vector que está definido por una posible asignación al usuario, el cual se encuentra caracterizado por el rendimiento de la [Ecuación 3.6](#). La matriz  $\mathbf{A}$  es para garantizar que una misma subportadora no es asignada a más de un usuario y  $\mathbf{x}$  es un vector binario que toma el valor de 1 y 0 cuando hay asignación al usuario y no existe asignación al usuario, respectivamente.

$$\text{Rendimiento} = \sum_u \sum_i \frac{12 \times 7}{0.5} BRE_u^i \#RB_u \quad \text{kbps}, \tag{3.6}$$

donde  $BRE_u^i$  es el número de bits por elemento de recurso para la  $i$ -ésima capa del  $u$ -ésimo usuario y  $\#RB_u$  es el número de RB asignados al  $u$ -ésimo usuario.

Los autores solamente consideran la adyacencia de las subportadoras y no la adyacencia de los RB, además la complejidad computacional es muy alta debido al problema de particionamiento. La evaluación del algoritmo es realizada bajo un SNR promedio de 10 dB y una variación de 1 a 16 usuarios. Los resultados muestran que el algoritmo propuesto logra un mejor rendimiento en comparación con el algoritmo RR y la asignación al mejor usuario.

En [31], los autores proporcionan un esquema de asignación de *chunks* de subportadoras que toma en cuenta dos funciones de utilidad: 1) tasa de datos de usuario agregado para maximizar la capacidad del sistema y 2) tasa de datos logarítmico de usuario agregado para asignar recursos a los usuarios que experimentan mala calidad de canal. El esquema de asignación de recursos es del tipo heurístico que mejora la utilidad marginal. Esta utilidad se obtiene mediante la diferencia entre la utilidad obtenida cuando el  $i$ -ésimo RB es asignado al  $k$ -ésimo usuario y la utilidad del  $k$ -ésimo usuario en la ausencia de una asignación de RB. El método de asignación de RB es del tipo *greedy*, lo que significa que asigna el RB al usuario sustentado en el valor más alto de la utilidad marginal. De acuerdo a [23], la asignación de RB a usuarios sustentado en la utilidad marginal no garantiza una condición óptima debido a su alta complejidad y alto tiempo de convergencia. Por otra parte, no consideran la contigüidad en la asignación de RB, solamente consideran la contigüidad de las subportadoras.

En [35] comparan el cociente de la potencia pico sobre la potencia promedio (PAPR, por sus siglas en inglés) a través de la distribución complementaria acumulada (CCDF, por sus siglas en inglés) de dos diferentes tipos de asignación de recursos, localizada y distribuida. Los resultados mostraron que la asignación distribuida presenta un incremento del PAPR de 2.7% comparado con el PAPR de la asignación localizada. Por tal motivo, ellos proponen tres algoritmos de asignación de recursos en el dominio de la frecuencia para SC-FDMA, bajo la restricción de contigüidad: 1) primera máxima expansión (FME, por sus siglas en inglés), 2) expansión máxima recursiva (RME, por sus siglas en inglés) y 3) mínima diferencia de área con base en la envolvente ( $MAD^E$ , por sus siglas en inglés). Los 3 algoritmos presentados en este artículo toman en cuenta la ganancia de diversidad multiusuario, es decir, asigna recursos al usuario a través de su condición de canal.

Para llevar a cabo la asignación de recursos mediante la calidad de canal, los algoritmos reciben una matriz del estado de canal RB-UE bajo la métrica de justicia proporcional (PF, por sus siglas en inglés). Los 3 algoritmos presentan una buena aproximación a la solución óptima, dejando en claro, que también son soluciones subóptimas para el problema de optimización [23].

El algoritmo FME inicia con la búsqueda del valor de métrica más alto RB-UE (métrica  $PF$ ), una vez localizado el valor máximo realiza la primera asignación ( $RB_0 - UE_0$ ). El algoritmo continua con la búsqueda del valor máximo para las siguientes asignaciones tomando como punto de partida la primera asignación. Por tal motivo, el algoritmo se expande a los extremos, columna izquierda (Col  $j-1$ ) ó derecha (Col  $j+1$ ) con respecto a la primera asignación; si Col  $j-1$  tiene mayor métrica, la búsqueda se expande a la izquierda, otro caso se expande a la derecha. Existe asignación al usuario anterior inmediato; si el valor máximo aún pertenece a este, otro caso, se realiza la asignación a un nuevo usuario: 1) si el valor máximo pertenece a otro usuario y 2) si el nuevo usuario no rompe la restricción de contigüidad. Finalmente, si no se puede expandir la búsqueda sobre un extremo y todavía existen RB disponibles se continúa con el siguiente extremo.

El algoritmo RME inicia con la búsqueda del valor máximo de RB-UE, al cual le asigna un  $RB_0-UE_0$ ; esta asignación se expande hacia la derecha e izquierda y se detiene hasta que encuentra otro UE con una mejor métrica y, a su vez, pone en modo *idle* al  $UE_0$  y se repite este proceso (la búsqueda del valor máximo se hace entre los usuarios no *idle* y RB no asignados) hasta que todos los UE están en modo *idle* o todos los RB se encuentren completamente asignados. Si aún existen RB por asignar, se inicia una nueva búsqueda del valor máximo entre los RB sobrantes y la asignación de RB se da cuando: 1) el RB es adyacente a los RB de un UE que se encuentra en modo *idle* y 2) se expande la asignación de un extremo hasta alcanzar la contigüidad y del otro extremo hasta encontrar un valor de métrica más alto de otro usuario (modo *idle*).

El algoritmo  $MAD^E$  busca el valor mínimo de la diferencia entre la métrica acumulativa del UE y la envolvente de la métrica del UE. La envolvente de la métrica son los valores máximos de cada par RB-UE y en conjunto con la propiedad de contigüidad dan lugar a una asignación de forma grupal comúnmente conocido como RC.

Los RC dan origen a una matriz  $[N \times N_{RC}]$ , donde  $N_{RC}$  es el número de RC y el valor de cada elemento de la matriz. El elemento de cada matriz se obtiene a través de la [Ecuación 3.7](#):

$$diferencia\_area = \frac{envolvente\_metrica - metrica\_UE}{\#RB's\ que\ conforman\ el\ RC}. \quad (3.7)$$

Debido a que este enfoque trabaja a nivel de RC y no a nivel de RB la complejidad computacional disminuye, pero es importante hacer notar que este algoritmo depende del escenario dado, por ejemplo en un canal altamente selectivo en frecuencia la solución combinatorial es  $N_{RC} \approx N_{RB}$ . Finalmente, los 3 algoritmos son evaluados en escenarios de área local y amplia considerando el paradigma de contigüidad. De acuerdo a sus resultados obtenidos, los autores afirman que el algoritmo RME presenta un alto desempeño con una complejidad computacional considerablemente baja.

En [\[48\]](#), los autores adaptan la métrica PF del dominio del tiempo a un enfoque de asignación de recursos de radio en el dominio de la frecuencia. Bajo este contexto, los autores proponen la siguiente función objetivo PF:

$$max \sum_i \sum_c x_i^c(t) \lambda_i^c(t), \quad (3.8)$$

donde  $\lambda_i^c(t)$  es el valor de métrica PF:

$$\lambda_i^c(t) = \frac{r_i^c(t)}{R_i(t)}, \quad (3.9)$$

donde  $r_i^c(t)$  es la tasa de canal instantáneo para el  $i$ -ésimo usuario sobre el  $c$ -RB a un  $t$ -tiempo y  $R_i(t)$  es la tasa de servicio de largo plazo (*long-term*).

Por lo tanto, con la métrica adaptada al dominio de la frecuencia, tres algoritmos heurísticos de asignación de recursos han sido propuestos: 1) Alg. 1, portadora-a-portadora, 2) Alg. 2, asignación del primer RB con métrica más alta y 3) Alg. 3, *Riding peaks*. El algoritmo portadora-a-portadora (Alg. 1) realiza una búsqueda del usuario que cumple con las siguientes dos restricciones: a) usuario que maximiza el valor de métrica PF ([Ecuación 3.9](#)) y b) los RB que satisfacen la restricción de contigüidad.



El Alg. 2 asigna RB a los usuarios con la métrica más alta PF y, por consiguiente, la asignación obtenida es la siguiente: RB1-UE1, RB2-UE3, RB3-UE2, RB4-UE1 y RB5-UE1 (ver Fig. 3.3). El algoritmo con el objetivo de cumplir con la restricción de contigüidad asigna (empaqueta) los 5 RB al usuario 1 quitando el RB2 y RB3 al UE3 y UE2 (ver Fig. 3.3), respectivamente.

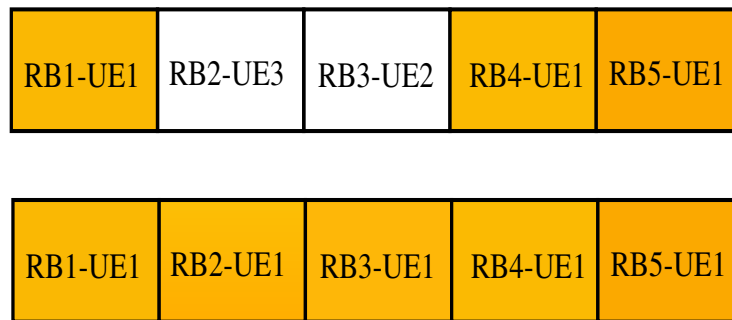


Figura 3.3: Empaquetado de los RB.

El Alg. 3 parte de la siguiente idea, si el par  $c$ -RB  $\leftrightarrow$   $i$ -UE presenta una buena calidad de canal sus RB vecinos tienen una alta probabilidad de presentar una buena calidad de canal. La Figura 3.4 muestra el funcionamiento del algoritmo donde los usuarios A, B y C reciben sus RB de acuerdo a sus picos más altos. Es importante observar que el Alg. 2 asignaría los RB de los 3 primeros picos al usuario A y dejaría sin RB al usuario B. Por tal motivo, los autores presentan Alg. 3 como una mejora del Alg. 2.

El Alg. 3 presenta un mejor rendimiento y justicia (equidad) en la asignación de recursos comparado con Alg. 1 y Alg. 2 presentados en el artículo.

En [49] presentan el algoritmo de expansión máxima recursiva mejorada (IRME, por sus siglas en inglés), el cual mejora ligeramente la eficiencia espectral del RME. Sin embargo, el precio que hay que pagar es un incremento considerable en la complejidad del algoritmo. IRME considera un umbral que proporciona opciones de expansión de RB a la derecha o izquierda.

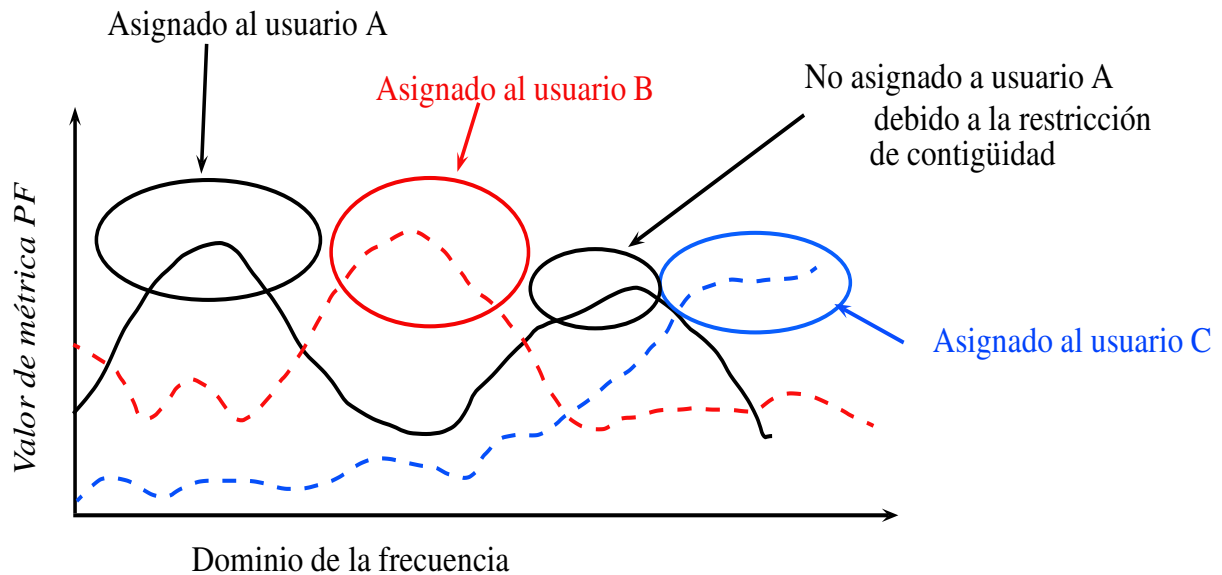


Figura 3.4: *Ride peaks* [48].

En [56] presentan una mejora del algoritmo STRA a través del algoritmo heurístico (de baja complejidad) asignación de recursos con base en estimaciones de límite superior (UBERA, por sus siglas en inglés). Los autores detectan un error en la asignación de recursos del algoritmo STRA, el cual presenta incrementos negativos en el rendimiento del sistema. Con base en esta observación, la idea principal del algoritmo UBERA está enfocado en la diferencia de la tasa máxima entre la tasa más alta de RB y la segunda mejor tasa de RB (a nivel de columnas de la matriz del estado de canal). Después, el algoritmo realiza una comparación de los resultados de cada diferencia con la finalidad de seleccionar el mayor y, así, asignar el RB correspondiente al usuario (con valor más alto de la tasa).

El diseño de UBERA toma en cuenta las dos restricciones: 1) asignación de recursos de forma contigua y 2) asigna el mismo MCS a todas las subportadoras asignadas a un usuario bajo el concepto de capacidad de RB robusto. El proceso completo de UBERA consiste en 4 fases: 1) la creación de una tabla con tres parámetros; tasa original de RB, tasa restringida de RB y tasa de RB con ventana restringida; 2) la asignación del primer RB y actualización de la tabla; 3) selección del siguiente candidato RB-UE y 4) estimación de la suma de tasas de todas las posibles combinaciones.

Sin embargo, la latencia de UBERA es alta porque realiza un almacenamiento y una actualización constante de la tabla de asignación. Por otra parte, los resultados de la evaluación de desempeño muestran que UBERA tiene mejor rendimiento del sistema que STRA y TTRA. Otro aspecto relevante está relacionado con el tamaño de ventana de asignación de RB, el cual con un valor de cinco presenta un buen desempeño el algoritmo.

En [57], los autores proponen dos algoritmos heurísticos de asignación de recursos: 1) algoritmo de asignación de RB eficiente y oportunista (OEA, por sus siglas en inglés) y 2) algoritmo de asignación de RB eficiente y oportunista con base en calidad de servicio (OEA-QoS, por sus siglas en inglés). El enfoque principal del algoritmo OEA consiste en asignar RB a un usuario, si y solo si, la asignación mejora el rendimiento del sistema. Bajo este enfoque, el algoritmo es diseñado para asignar RB al usuario que tenga un rendimiento distinto de cero para evitar el desperdicio de recursos de radio. El algoritmo OEA utiliza la métrica  $SINR_{effk}^c$  con base en el método de capacidad del canal (capacidad de Shannon) promedio instantáneo. En primera instancia, el algoritmo ejecuta la búsqueda del valor máximo RB-UE para realizar la asignación de  $c$ -RB a  $k$ -UE, después se expande la búsqueda a la derecha (C+1) ó izquierda (C-1) para seleccionar el  $c$ -RB con el valor de métrica más alto. El algoritmo busca cumplir con dos restricciones: 1) el RB adyacente seleccionado es asignado si mejora el rendimiento de  $k$ -UE y 2) el máximo número de RB asignados al mismo usuario no debe superar  $\alpha_{k_{max}}$  (límite de RB). Por tal motivo, para satisfacer la restricción uno, se debe actualizar la métrica  $SINR_{effk}^c$  antes de cada expansión de búsqueda.

El algoritmo OEA-QoS es menos oportunista y el número de RB asignados a un usuario se encuentra definido por la [Ecuación 3.10](#):

$$\alpha_{k_{max}} = \left\lceil \frac{SINR_{target}}{\min(SINR_{effk}^c)} \right\rceil. \quad (3.10)$$

Para el caso del OEA  $\alpha_{k_{max}} = N_{RB}$ .

Los autores evalúan el desempeño del OEA (con métrica  $SINR_{eff_k}^c$ ) con respecto a los algoritmos: RME, primer valor de métrica más grande (FDPS-LMF, por sus siglas en inglés) y algoritmo de gradiente localizado heurístico (HLGA, por sus siglas en inglés), los tres algoritmos bajo una métrica PF. En la comparación de los algoritmos agregan un algoritmo oportunista que asigna el mejor RB al mejor usuario a través de la métrica  $SINR_{eff_k}^c$  (con base en la capacidad instantánea promedio), sin actualizar el valor de la métrica SINR después de cada asignación de RB.

De acuerdo a los resultados presentados por los autores, el algoritmo OEA presenta mejor rendimiento comparado con los algoritmos, RME, FDPS-LMF y HLGA, debido a que las métricas  $SINR_{eff_k}^c$  y PF tienen objetivos muy diferentes en la asignación de recursos. La métrica PF tiene el objetivo de maximizar la justicia y el costo que hay que pagar es un decremento considerable en el rendimiento del sistema, mientras que la métrica  $SINR_{eff_k}^c$  tiene el objetivo de maximizar el rendimiento. Por esta razón, no es adecuada la comparación realizada. Por otra parte, en términos de complejidad computacional, RME es menor que el OEA con 10 a 40 usuarios en la celda y con 40 usuarios OEA tiene menor complejidad computacional.

La actualización de la métrica que el algoritmo OEA realiza antes de la expansión, no afecta en su complejidad computacional. Sin embargo, es crucial en términos de retardos en un sistema real de LTE. La actualización de la métrica en un sistema de la vida real siempre estaría ejecutando toda la pila del procesamiento de la adaptación de enlace para obtener el MCS. Por tal motivo, no es conveniente realizar este tipo de actualizaciones en canales de alta movilidad y rápidas fluctuaciones.

En [54], los autores presentan una extensión del artículo [57] mediante la inserción de un módulo de asignación de potencia a los usuarios que ya han sido beneficiados con RB. Los algoritmos propuestos en este artículo tienen el objetivo de maximizar el rendimiento del sistema, es decir, asignar recursos de radio a los usuarios que presentan mejor calidad de canal. Sin embargo, los algoritmos presentados en el artículo fueron comparados con algoritmos (presentados en la literatura) que tienen métricas PF.

Los algoritmos PF asignan recursos a los usuarios que experimentan mala calidad de canal y, por consiguiente, el rendimiento del sistema se degrada. Por esta razón, no es consistente la comparación de los algoritmos debido a que el objetivo de la asignación de recursos no es el mismo.

Por otra parte, la restricción de contigüidad en la asignación de RB conduce a una búsqueda exhaustiva del mejor UE que origina algoritmos del tipo *NP-Hard* y, por consiguiente, diseños e implementaciones imprácticas en sistemas reales de LTE [48]. Por esta razón, los algoritmos heurísticos tienen la finalidad de encontrar una solución suficientemente buena a través de la simplicidad computacional. Debido a esto, los algoritmos de tipo heurístico presentan un rendimiento muy bueno en diseños prácticos de la vida real [22]. Fundamentado en la importancia de los algoritmos heurísticos en [22], evalúan el desempeño de los algoritmos RME, FME y *Riding Peaks*.

Los tres algoritmos heurísticos han sido programados bajo dos métricas de asignación de recursos: 1) dependiente del canal (CD, por sus siglas en inglés) y 2) PF. Los algoritmos que los autores evalúan son los siguientes: CD-RME, CD-FME, CD-*Riding Peaks*, PF-RME, PF-FME y PF-*Riding Peaks*. Los resultados muestran que los algoritmos CD-RME y CD-*Riding Peaks* presentan mayor rendimiento debido a que ambos buscan el par máximo RB-UE de forma recursiva, a diferencia del algoritmo CD-FME, el cual busca el primer máximo y luego trabaja de forma iterativa sobre los RB.

Otro aspecto observado está relacionado con la diversidad de multiusuario del sistema LTE, el cual se presenta cuando el rendimiento incrementa en cuanto el número de usuarios aumenta. Por otra parte, los algoritmos PF-RME, PF-*Riding Peaks* y PF-FME presentan menor rendimiento debido a que el objetivo de la métrica PF es asignar recursos a usuarios con mayor degradación de canal. En términos de justicia (*fairness*), PF-RME, PF-*Riding Peaks* y PF-FME presentan mayor justicia en comparación con CD-RME, CD-*Riding Peaks* y CD-FME.

En [58], los autores presentan el algoritmo métrica dual oportunista (ODM, por sus siglas en inglés), la idea principal consiste en dar prioridad a los usuarios que experimentan una buena calidad de canal y de forma simultánea considerar a los usuarios que no presentan buena calidad de canal.

Para lograr el objetivo proponen dos matrices de asignación de recursos mediante las métricas, mejor indicador de calidad de canal (BCQI, por sus siglas en inglés) y PF. Esto con la finalidad de mejorar el rendimiento del sistema y proporcionar una asignación equitativa de los recursos de radio entre los usuarios. Las métricas de ambas matrices PF ( $H_1$ ) y BCQI ( $H_2$ ) están reflejadas en la [Ecuación 3.11](#), versión tomada de [\[59\]](#):

$$H_{n,m} = \left\{ \alpha \cdot \left( \frac{R_n(t)}{\dot{T}_n} \right) + \beta \cdot \left( \frac{R_n(t)}{\max_{\forall i} (R_i(t))} \right) \right\}, \quad (3.11)$$

donde  $H_{n,m}$  es la métrica de calendarización del  $n$ -ésimo usuario y  $m$ -ésimo RB tomado de la matriz de asignación de recursos (H),  $R_n(t)$  es la tasa de bit del  $n$ -ésimo usuario y  $\dot{T}_n$  es la tasa promedio del  $n$ -ésimo usuario sobre los subframes pasados.

De la [Ecuación 3.11](#), cuando  $\alpha = 0$  y  $\beta = 1$ , la métrica es exclusiva para BCQI, en caso contrario está presente la métrica PF. Los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  determinan el desempeño del calendarizador, por ejemplo, para los valores de  $\alpha = 1$  y  $\beta = 0.25$  la [Ecuación 3.11](#) se encuentra en una configuración de máximo rendimiento. Otro caso, para valores de  $\alpha = 0.75$  y  $\beta = 0.5$  presenta un comportamiento de máxima justicia.

El diseño del calendarizador toma en cuenta la restricción de contigüidad. En cuanto al MCS, no presenta información alguna. Además, la utilización de dos matrices de métricas incrementa el tiempo de búsqueda al algoritmo. Por otra parte, la evaluación del algoritmo es llevado a cabo en el simulador a nivel-enlace para el enlace de subida de Vienna [\[34\]](#). Sin embargo, en la simulación solamente utilizan 20 iteraciones y un intervalo de 20 a 40 usuarios. Los resultados obtenidos de la evaluación no presentan ningún cambio del rendimiento (permanece constante) en cuanto el número de usuarios incrementa. Por tal motivo, no son muy claros los resultados presentados en este artículo.

### 3.2.2. Tabla comparativa de la literatura revisada

A continuación se muestra la [Tabla 3.2](#), la cual presenta una comparación de la literatura especializada. Nosotros comparamos diferentes parámetros con el objetivo de remarcar que trabajos de investigación abordan los siguientes temas: 1) asignación de MCS, 2) análisis de adaptación de enlace, 3) evaluación de los algoritmos en un simulador a nivel de enlace, 4) evaluación de los algoritmos en entornos con fluctuaciones rápidas y diferentes valores de velocidades y 5) la compatibilidad con el estándar LTE.

Por otra parte, los temas que estamos abordando en la comparación de la literatura especializada son los temas que estaremos abordando en este trabajo de tesis.

#### Parámetros de comparación

**A-CQI.** Asignación de CQI.

**AAE.** Análisis de la adaptación de enlace a través del mapeo CQI-SINR.

**EFFV.** Entorno con fluctuaciones rápidas y velocidades.

**SAE.** Simulación a nivel de enlace.

**CS-LTE.** Compatible con el estándar LTE.

De acuerdo con la [Tabla 3.2](#), los artículos [\[22\]](#), [\[16\]](#) y [\[23\]](#) presentan la evaluación de algoritmos de calendarización de LTE para el enlace de subida. En estos artículos, el algoritmo RME ha presentado un buen rendimiento del sistema LTE, además es un algoritmo dependiente del canal. Por otra parte, es importante destacar que en la evaluación del algoritmo no toman en cuenta alguna técnica de asignación del MCS, además de no estar muy clara la adaptación del enlace utilizada por los autores. Actualmente, las restricciones antes mencionadas deben ser consideradas en la implementación de algoritmos de asignación de recursos de LTE para obtener resultados más cercanos a un sistema real de LTE.

Dentro del estudio realizado, los algoritmos de asignación de recursos, adaptación de enlace y asignación del índice de CQI no han sido estudiados, implementados y evaluados en forma conjunta. Además, no existen evaluaciones a nivel de subportadora (simulación a nivel de enlace) para entornos con fluctuaciones rápidas y diferentes velocidades. Por las razones antes mencionadas, este trabajo de tesis trata de cubrir esa carencia en el estado del arte, mediante los objetivos planteados al inicio de esta tesis.

Artículo	A-CQI	AAE	EFFV	SAE	Enlace	CS-LTE
[16], 2014	X	X	X	X	Subida	✓
[22], 2012	X	X	X	X	Subida	✓
[23], 2016	X	X	X	X	Subida	✓
[30], 2012	X	✓	X	X	Subida	✓
[31], 2006	X	X	X	X	Subida	✓
[35], 2008	X	X	X	X	Subida	✓
[36], 2007	X	X	X	X	Subida	✓
[37], 2010	X	X	X	X	Subida	✓
[38], 2008	X	X	X	X	Subida	✓
[39], 2010	X	X	X	X	Subida	✓
[40], 2006	X	X	X	X	Subida	✓
[41], 2008	X	X	X	X	Subida	✓
[43], 2010	X	X	X	X	Subida	✓
[44], 2010	X	X	X	X	Subida	✓
[45], 2008	X	X	X	X	Subida	✓
[46], 2011	Mín-Capacidad	✓	X	X	Subida	✓
[48], 2008	X	X	X	X	Subida	✓
[49], 2010	X	X	X	X	Subida	✓
[54], 2015	Mín-SINR	✓	X	X	Subida	✓
[56], 2013	Mín-SINR	✓	X	X	Subida	✓
[57], 2013	Mín-Capacidad	✓	X	X	Subida	✓
[58], 2015	X	X	X	✓	Subida	✓

Tabla 3.2: Tabla comparativa del estado del arte de los algoritmos de asignación recursos.

### 3.3. Simuladores LTE

#### 3.3.1. Literatura especializada

Los artículos [34], [60], [61], [62] presentan varios simuladores que cumplen con el estándar LTE.



A inicios del 2009, la carencia de simuladores de LTE de código abierto y la no disponibilidad al público, estimulan el desarrollo de los simuladores de enlace de bajada de LTE a nivel de enlace y de sistema. El objetivo de los autores fue proporcionar simuladores que cumplan con el estándar LTE de código abierto y licencia libre para uso académico. En el año 2012, el grupo de investigadores de la universidad de Vienna (autores de los artículos antes citados) presentaron un simulador a nivel de enlace de LTE para el enlace de subida debido a las necesidades de evaluar algoritmos a nivel de capa física y algoritmos de asignación de recursos en el dominio de la frecuencia. Este grupo cuenta con tres simuladores bajo una licencia de uso libre para investigación [64]: 1) simulador a nivel de sistema de LTE del enlace de bajada, 2) simulador a nivel de enlace de LTE de enlace de bajada y 3) simulador a nivel de enlace de LTE de enlace de subida. Por otra parte, es importante remarcar que para reducir la complejidad de las simulaciones de LTE, los simuladores están divididos en dos niveles: 1) nivel de enlace y 2) nivel de sistema.

- Simulador a nivel de enlace: se encuentra dividido en 3 partes básicas, transmisor, canal y receptor. En la práctica es una implementación directa de la capa física de LTE que cumple con el estándar 3GPP, el cual incluye: procedimientos de segmentación, codificación de canal, MIMO, generación de la señal a transmitir, señales pilotos, secuencias de sincronización y algoritmos de asignación de recursos en el dominio de la frecuencia. El escenario de simulación comúnmente está fundamentado en un eNB y varios UE [60].
- Simulador a nivel de sistema: se encuentra enfocado en temas relacionados con la red, como la calendarización en el dominio del tiempo, control de admisión, gestión de la movilidad, optimización y planeación de la red, es decir, evita el procesamiento de toda la capa física de LTE (está descrito mediante un medio analítico). El escenario de simulación comúnmente está formado de varios eNB y varios usuarios [60].

La literatura revisada, referente a simuladores de LTE, muestra que en su mayoría se trata de simuladores a nivel de sistema, los cuales citamos a continuación:

- En [63] proponen LTE-Sim, un simulador de eventos discretos a nivel de sistema de código abierto que puede modelar tres tipos de nodos: 1) UE, 2) eNB y 3) entidad de gestión de movilidad/puerta de enlace (MME/GW, por sus siglas en inglés).

Además, el simulador soporta entornos multicelda o monocelda y varios calendarizadores en el dominio del tiempo escritos en C++ orientado a objetos. También, cuenta con la pila de protocolos de LTE de plano de control y de usuario.

- El simulador NS-3 es un simulador de eventos discreto a nivel de sistema, el cual está escrito en C++ bajo la licencia pública general (GNU, por sus siglas en inglés) [65] y es principalmente compatible con el sistema operativo Linux. Bajo este enfoque, el simulador de red LTE-núcleo de paquetes avanzado (LENA, por sus siglas en inglés) es implementado en [66]. El simulador incluye el modelo del núcleo de paquetes avanzado (EPC, por sus siglas en inglés) y la pila de protocolos de LTE, tales como control de recursos de radio (RRC, por sus siglas en inglés), protocolo de convergencia de paquetes de datos (PDPC, por sus siglas en inglés), control de enlace de radio (RLC, por sus siglas en inglés) y control de acceso al medio (MAC, por sus siglas en inglés). Además, el simulador utiliza los modelos de modulación y codificación adaptiva de Vienna y Piro [67].
- SimuLTE es un simulador de eventos discretos a nivel de sistema de código abierto, bajo el entorno de banco de pruebas de red modular objetivo en C++ (OMNeT++, por sus siglas en inglés) e INET compatible con los sistemas operativos, windows, linux y MAC. El simulador está escrito en C++, el cual cuenta con la pila de protocolos de LTE, EPC y soporte de calendarización en el dominio del tiempo. De acuerdo a [68], SimuLTE ha sido desarrollado en OMNeT++ por las siguientes razones:
  1. OMNeT++ es mucho más estable y maduro que NS-3.
  2. El simulador está programado de una forma modular que permite una mejor escalabilidad de los códigos.
  3. OMNeT++ contiene una gran cantidad de modelos de simulación de redes.
  4. OMNeT++ maneja interfaces gráficas que permiten a los nuevos usuarios comprender y aprender de forma más rápida el simulador.
  5. OMNeT++ cuenta con una gran comunidad de la industria y de la academia que aportan mejoras al simulador.

- Riverbed Modeler (antes OPNET) es un simulador a nivel de sistema de código cerrado que requiere un pago de la licencia de uso.

El simulador permite modelar: UE, eNB, EPC y toda la pila de protocolos de LTE. El simulador permite obtener una variedad de métricas para la evaluación de algoritmos, y con la licencia activada se puede acceder a varios ejemplos y documentación del simulador.

Los simuladores a nivel de sistema antes mencionados se encuentran orientados principalmente al enlace de bajada de LTE. Sin embargo, existen algunos intentos de crear y mejorar el enlace de subida de LTE, pero aún no podemos hacer un análisis a detalle de un enlace de subida de LTE en estos simuladores. Esto significa que los simuladores a nivel de enlace no permiten utilizar la asignación de recursos a nivel de subportadoras debido a que evitan todos los módulos de procesamiento de señales de capa física de LTE. Por tal motivo, en este trabajo de investigación nos inclinamos en utilizar el simulador de LTE a nivel de enlace de Vienna, para el enlace de subida, el cual es dedicado exclusivamente para el enlace de subida de LTE, presentado inicialmente en el año 2011 en [34] y cuya versión más reciente se refiere en [33]. La Universidad de Vienna ha presentado un libro [62] sobre un compendio de los simuladores que han desarrollado para la tecnología LTE del enlace de subida y de bajada. Esto demuestra que los simuladores han pasado por una revisión especializada por parte de investigadores expertos en el área de las redes de LTE.

El simulador de LTE a nivel de enlace, permite analizar de forma muy profunda la calidad de canal de cada suportadora a través de la post-demodulación SC-FDMA. También, se pueden analizar las fluctuaciones (derivados del modelo de canal) que experimentan los usuarios en cada una de sus subportadoras. Otro aspecto relevante está relacionado con la asignación del índice del CQI de forma directa al RB asignado al usuario. Debido a las características antes mencionadas, los algoritmos de asignación de recursos de radio dependiente de canal pueden ser implementados en este tipo de simulador. A diferencia de los simuladores a nivel de sistema que evita de todo el procesamiento de la capa física. A continuación, se muestra la [Tabla 3.3](#) del estado del arte de los simuladores de LTE.

## Parámetros de comparación

**TS.** Tipo del simulador a nivel de enlace (**NE**) o a nivel de sistema (**NS**).

**CS.** Compatible con el estándar de LTE.

**TE.** Tipo de enlace de subida o de bajada.

**LIC.** Licencia libre (**LL**), libre y de investigación (**LLI**) y licencia de paga (**LP**).

Tipo de compilación. Paralelo (Par.)

Artículo	Lenguaje	TS	CS	TE	LIC
[33], 2016 (Vienna)	Matlab (Par.), C	NE	✓	Subida	LLI
[34], 2011 (Vienna)	Matlab (Par.), C	NE	✓	Subida	LLI
[60], 2011 (Vienna)	Matlab	NS, NE	✓	Bajada	LLI
[61], 2009 (Vienna)	Matlab	NS, NE	✓	Bajada	LLI
[62], 2016 (Vienna book)	Matlab (Par.), C	NE	✓	Subida	LLI
[63], 2011 (LTE-Sim)	C++	NS	✓	Ambos	LL
[66], 2011 (NS-3), LENA	C++	NS	✓	Ambos	LL
[68], 2014 (OMNeT++)	C++	NS	✓	Bajada	LL
Riverbed	C	NS	✓	Ambos	LP

Tabla 3.3: Tabla comparativa de los simuladores de LTE.

En la [Tabla 3.3](#), se puede observar que los simuladores de Vienna tienen múltiples trabajos publicados en relación a diversos tipos de enlace de simulación y bajo una licencia libre para investigación. Por otra parte, el simulador Vienna tiene la capacidad de correr simulaciones de forma paralela y los módulos que demandan mayor complejidad computacional son implementados en lenguaje C, tales como la codificación y decodificación de canal, verificación de redundancia cíclica (CRC, por sus siglas en inglés) y la decodificación *soft sphere*. Por consiguiente, el tiempo de simulación se reduce considerablemente.

La codificación de los algoritmos presentados en esta tesis son implementados en un simulador de LTE Vienna para el enlace de subida a nivel de enlace.

## 3.4. Simulador de LTE a nivel de enlace para enlace de subida

### 3.4.1. Señales de referencia

Las señales de referencia utilizadas en la tecnología de LTE obtienen información sobre la degradación de las señales que se ven afectadas por las imperfecciones del canal de comunicación.

Las señales utilizadas son comúnmente conocidas como señal de referencia de sondeo (SRS, por sus siglas en inglés) y señal de referencia de demodulación (DMRS, por sus siglas en inglés). Las SRS son transmitidas, del UE al eNB, con el objetivo de sondear el ancho de banda correspondiente a las subportadoras asignadas (en un TTI o dos ranuras) al usuario. Típicamente, las SRS son transmitidas sobre el último símbolo SC-FDMA de un ms (mili segundo) de *subframe* [16], como se muestra en la [Figura 3.5](#).

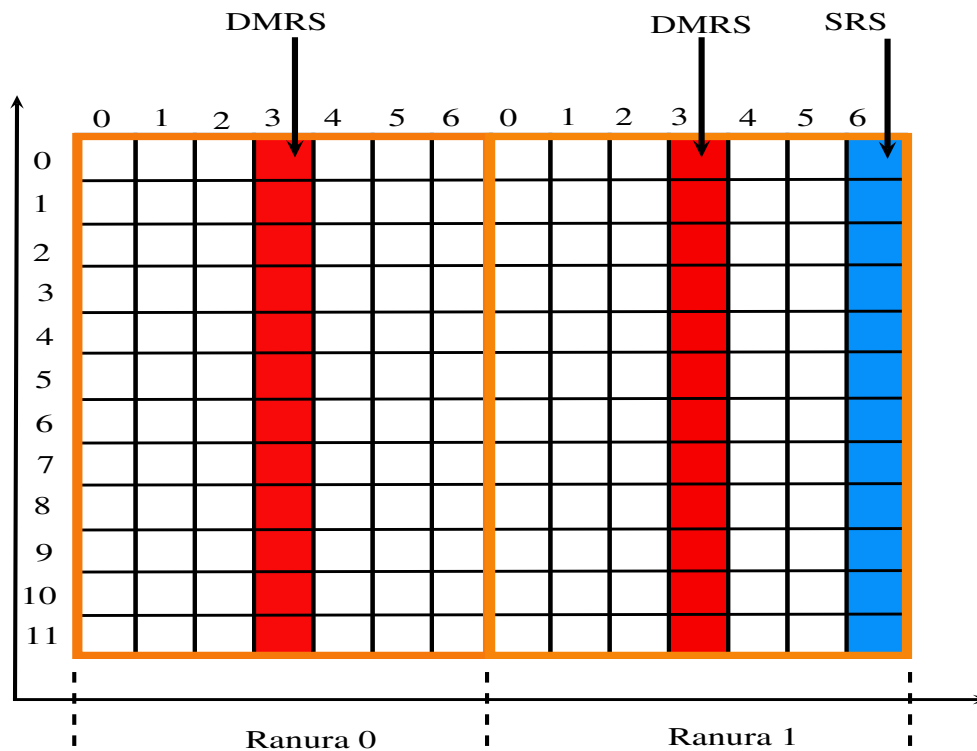
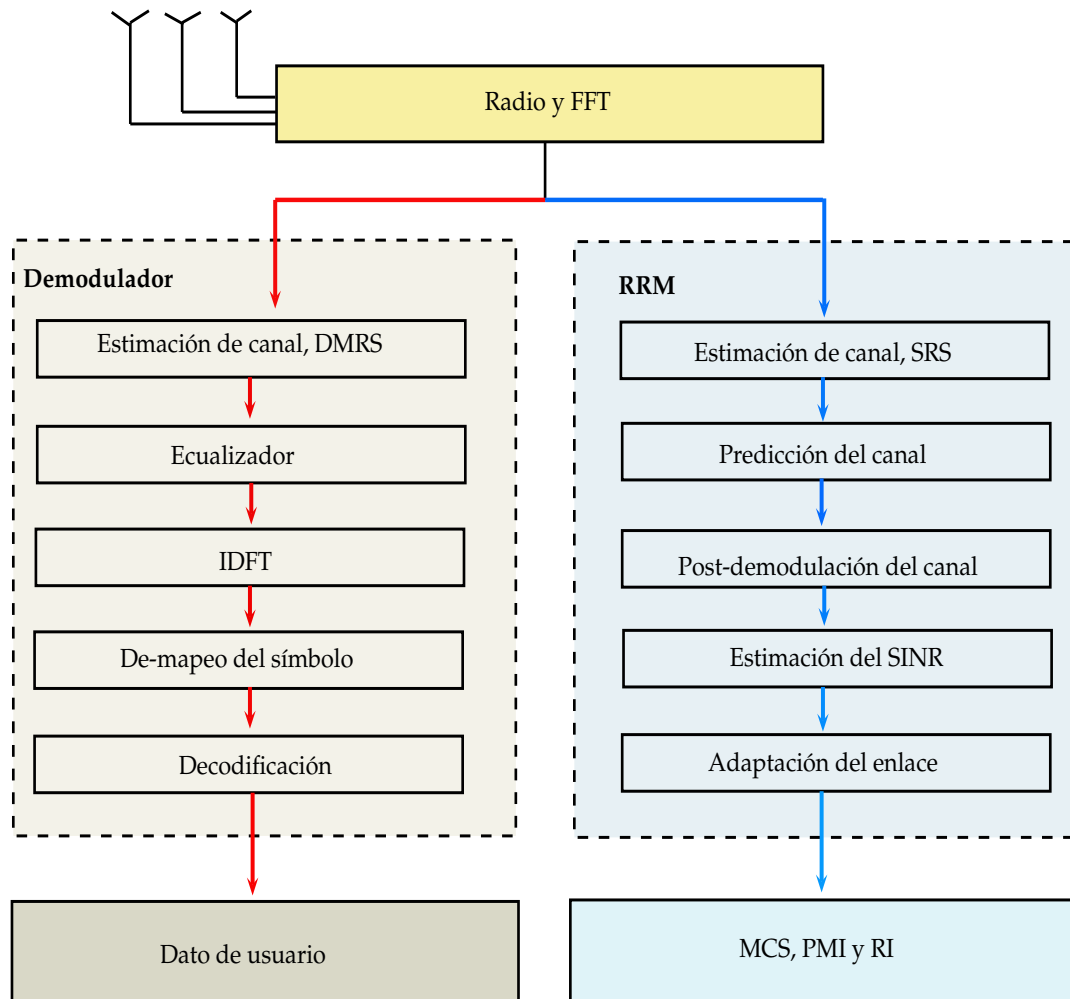


Figura 3.5: Asignación de símbolos de referencias, DMRS y SRS.

Las DMRS son utilizadas en la estimación de canal para la demodulación y detección coherente. Las DMRS dentro del canal compartido de enlace ascendente físico (PUSCH, por sus siglas en inglés) ocupa el cuarto símbolo de SC-FDMA (en cada ranura), como se muestra en la [Figura 3.5](#).

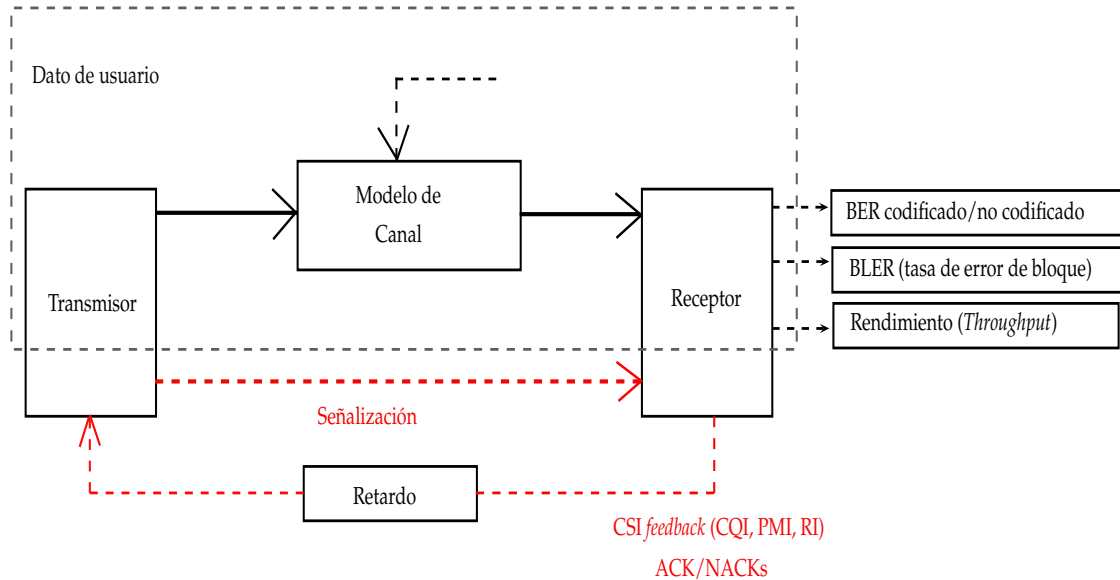
El módulo de gestión de recursos de radio (RRM, por sus siglas en inglés) se encarga de la calendarización, adaptación de enlace y potencia de transmisión. Con el objetivo de diferenciar los bloques de procesamiento de señales, por los que pasan las DMRS y SRS al ser recibidas por el eNB, se muestra la [Figura 3.6](#).

En particular la [Figura 3.6](#) muestra los dos módulos de procesamiento de señales, el demodulador y el RRM, para estimar las DMRS y las SRS, respectivamente.



[Figura 3.6](#): Estimación de los símbolos de referencia, DMRS y SRS [27].

En el contexto del simulador a nivel de enlace de LTE v1.5, la estructura interna del simulador está compuesto de los canales de comunicación, datos de usuario y señalización, como se muestra en la [Figura 3.7](#).



[Figura 3.7](#): Estructura interna del simulador de LTE a nivel de enlace[60].

El simulador contiene una gran diversidad de modelos de canal, tales como: ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN, por sus siglas del inglés), *flat Rayleigh*, peatonal A/B (PEDA/PEDB, por sus siglas en inglés), peatonal extendido A (EPA, por sus siglas en inglés), correlacionado B (CORRB, por sus siglas en inglés), vehicular A y B (VA/VB por sus siglas en inglés), vehicular extendido A (EVA, por sus siglas en inglés), urbano típico (TU, por sus siglas en inglés), urbano típico extendido (ETU, por sus siglas en inglés), área rural (RA, por sus siglas en inglés) y terreno montañoso (HT, por sus siglas en inglés). Además, tiene dos tipos de receptores ZF y MMSE.

Por otra parte, el simulador LTE de Vienna genera información muy importante como el CQI, indicador de rango (RI, por sus siglas en inglés) e indicador de la matriz de precodificación (PMI, por sus siglas en inglés), que conjuntamente dan lugar a la retroalimentación de la información del estado de canal (CSI, por sus siglas en inglés) para la adaptación de enlace. Otro punto importante, es la posibilidad de seleccionar las simulaciones bajo un entorno de fluctuaciones rápidas (FF, por sus siglas en inglés) en diferentes configuraciones, independiente y correlacionado.

La estimación del canal en el simulador está implementada bajo los métodos de mínimos cuadrados (LS, por sus siglas en inglés), transformada discreta de Fourier (DFT, por sus siglas en inglés) y el estimador MMSE. El simulador cuenta con la habilitación de las SRS para efectos del sondeo del canal.

### 3.4.2. Adaptación de enlace

El sondeo de canal proporciona información de la calidad del canal al eNB. Las señales de sondeo pasan por diversos bloques de procesamiento de señales, tales como (ver Fig. 3.6) la demodulación por multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM, por sus siglas en inglés), la estimación del canal, la post-demodulación del canal y la estimación del SINR [27].

El eNB, al concluir todo el procesamiento de las SRS, extrae toda la información del estado del canal. Con toda la información extraída, el eNB estima el SINR de todas las subportadoras de cada UE para generar la matriz de estado del canal.

El algoritmo de asignación de recursos en el dominio de la frecuencia utiliza la matriz del estado del canal para asignar los RB a los usuarios, mientras que el MCS, a través de la adaptación de enlace, realiza un mapeo SINR-CQI a los RB ya asignados a cada usuario. Finalmente, el eNB transmite el CSI (CQI, PMI y RI) a el UE utilizando los RB asignados y la adaptación de enlace, que el usuario debe utilizar durante la transmisión de su información sobre enlace de subida, como se muestra en la Figura 3.8.

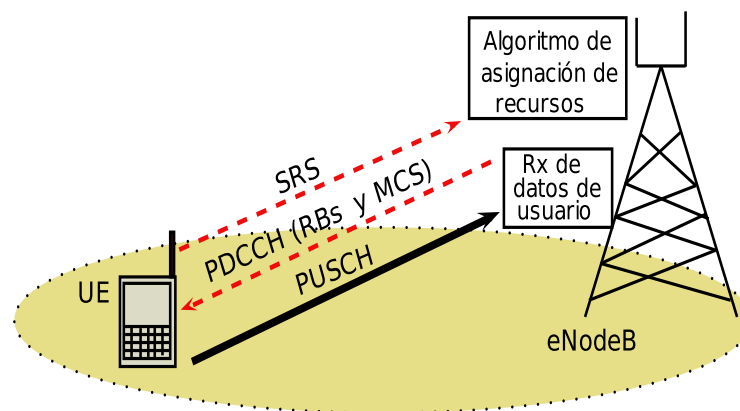


Figura 3.8: Adaptación de enlace en LTE.

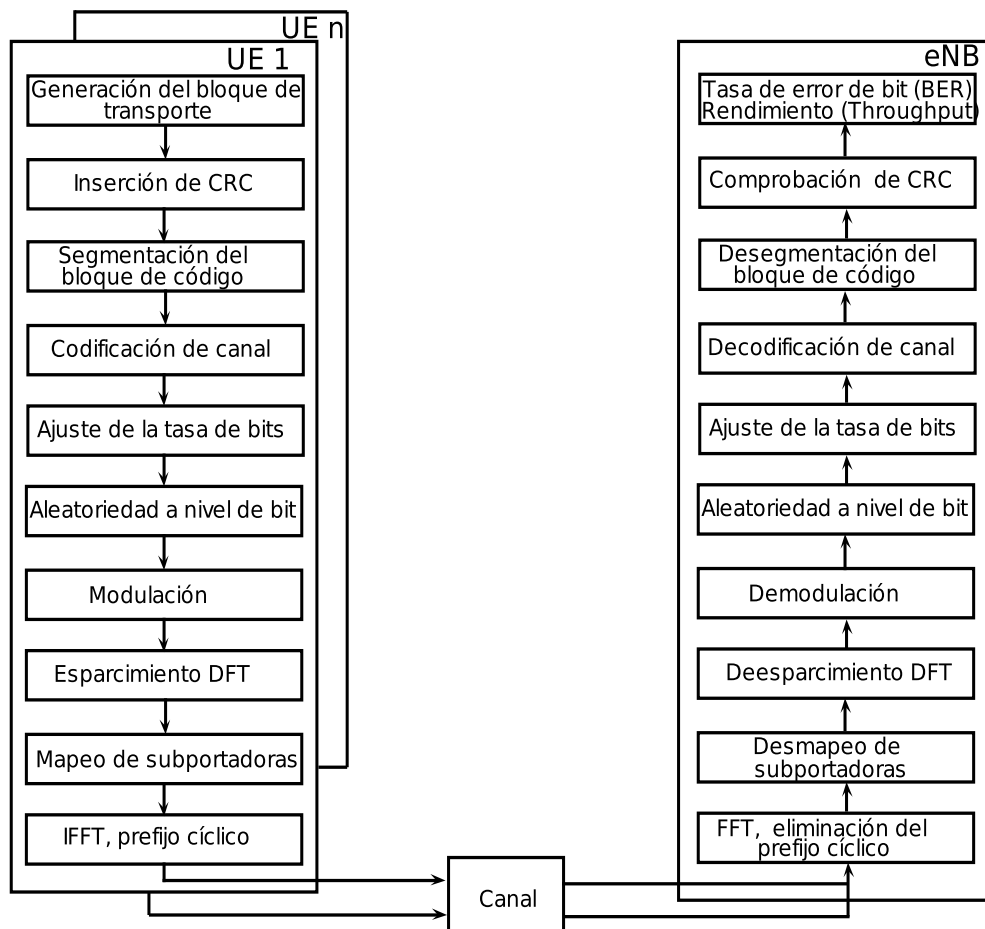


Cuando el UE recibe la información sobre la asignación de RB y los bits que puede transmitir en cada RB, todo el tráfico del UE es transmitido a través del PUSCH. Bajo este contexto, el simulador de LTE de Vienna contiene todos los módulos de procesamiento de señales para procesar el tráfico transmitido por el usuario. Los bloques internos en el transmisor y receptor son mostrados en la [Figura 3.9](#).

### 3.4.3. Canal PUSCH, datos de usuario

La capa física es el nivel donde se generan las señales con el objetivo de transmitir los datos tomando en cuenta las características del canal inalámbrico de comunicación.

La capa MAC transmite los bloques de transporte (TB) al canal PUSCH de LTE [\[34\]](#), como se muestra en la [Figura 3.9](#).



[Figura 3.9](#): Cadena de procesamiento de señal de LTE del enlace de subida [\[34\]](#).

El bloque de CRC agrega un CRC de 24 bits, producido por un polinomio generador del tipo A, para la detección de errores en la información transmitida. Después, si el TB es demasiado grande, el TB es segmentado en bloques de código (CB, por sus siglas en inglés), de 6144 bits, que pueden codificarse y decodificarse de forma independiente (bloque segmentación de CB). El CB también contiene un CRC de 24 bits, producido con un polinomio generador del tipo B [69], para detección de errores. Para proteger la información ante las imperfecciones del canal, el bloque de codificación de canal se encarga de agregar bits de redundancia a través de una turbo codificación. El bloque de ajuste de la tasa de bits se encarga de seleccionar un número arbitrario de bits de la secuencia de datos codificados recibidos del bloque de codificación de canal. Esto con el objetivo, de realizar la adaptación de la velocidad de la trama de bits, de tal manera que pueda ser transmitido los 7 o 6 símbolos OFDM en un subframe (1 ms) de LTE. El bloque de aleatoriedad de bit se encarga de recibir la trama de bits proveniente de un subframe para introducirla en un arreglo de registros de corrimiento. Enseguida, el registro de corrimiento realiza operaciones módulo 2, bit a bit [70], con la finalidad de obtener una secuencia aleatoria y, así, proporcionar robustez ante los efectos de interferencia y desvanecimientos originados por el canal inalámbrico. Por tal motivo, todas las células vecinas obtienen secuencias diferentes, lo que permite eliminar la interferencia entre estas [71]. El bloque de modulación se encarga de transformar la información recibida en símbolos IQ agrupados en diferentes tipos de constelaciones que depende del tipo de modulación digital utilizada (QPSK, 16QAM, 64QAM). El bloque de esparcimiento DFT se encarga de convertir la señal recibida del dominio en el tiempo al dominio de la frecuencia, esto con el objetivo de poder manipular las subportadoras. Además, como es un esquema SC-FDMA debe cumplir con la restricción de una sola portadora para optimizar el consumo de potencia en el usuario móvil. El bloque de mapeo de subportadoras se encarga de seleccionar el tipo de asignación de subportadoras, en el caso del enlace de subida utiliza el modo localizado (asignación contigua de subportadoras) con la finalidad de reducir el consumo de potencia en el usuario móvil. Finalmente, el bloque de la transformada rápida de Fourier inversa (IFFT, por sus siglas en inglés) y prefijo cíclico se encargan de realizar la modulación OFDM e insertar el prefijo cíclico, respectivamente. Esto último con la finalidad de mantener la ortogonalidad y combatir los efectos de multitrayectoria ocasionado por la dispersión del canal inalámbrico.

# Capítulo 4

## Diseño del algoritmo de asignación de recursos y de la adaptación de enlace

### 4.1. Introducción

El diseño e implementación del algoritmo de asignación de recursos, en el dominio en la frecuencia, requiere del conocimiento de diversos módulos de procesamiento de las señales de la estación de base de la tecnología evolución a largo plazo (LTE, por sus siglas en inglés). El algoritmo requiere de diferentes parámetros, tales como la calidad del canal de las subportadoras del usuario y el índice del indicador de calidad de canal (CQI, por sus siglas en inglés), para asignar la cantidad de bits que puede transportar el bloque de recurso (RB, por sus siglas en inglés). Para obtener dichos parámetros es necesario contar con los módulos del algoritmo de asignación de RB, el módulo de la adaptación de enlace y el módulo de la variante de la asignación del esquema modulación y codificación (MCS, por sus siglas en inglés). Por lo tanto, se requiere comprender de forma exhaustiva y profunda el concepto teórico para desarrollar los módulos antes mencionados en un simulador.

De acuerdo con el estudio de la literatura especializada, el simulador de LTE de Viena, a nivel de enlace v.1.5, cumple con las características requeridas para llevar a cabo este trabajo de tesis. En este sentido, un aspecto importante fue verificar su rendimiento simulado resultante con el rendimiento teórico de LTE para validar su correcto funcionamiento.

Una vez validado el simulador, se procedió a implementar los módulos de procesamiento de señal para poder dar inicio a la verificación de nuestra hipótesis, planteada al inicio de este trabajo de investigación.

En esta tesis, se diseña e implementa el algoritmo de asignación de recursos expansión máxima recursiva (RME, por sus siglas en inglés) en el dominio de la frecuencia. Este algoritmo es del tipo heurístico y, de acuerdo a la literatura especializada, RME presenta un buen rendimiento y baja complejidad computacional, lo que resulta muy conveniente para ser implementado en el enlace de subida de LTE.

Por otra parte, con base en el análisis, estudio y evaluación de la adaptación de enlace clásico, concluimos que esta técnica implica un considerable desperdicio de recursos de radio en entornos vehículo-infraestructura bajo fluctuaciones rápidas (*fast fading*) y altas velocidades. Para mitigar los efectos de la adaptación de enlace clásico, se propone una versión mejorada del algoritmo que incrementa el rendimiento del sistema, evita considerablemente el desperdicio de recursos de radio y mantiene una considerable equidad en la asignación de recursos.

Finalmente, se proponen algunas variantes de asignación de MCS para controlar la asignación del número de bits que transporta un RB. Estas variantes son implementadas en el simulador de LTE y cada variante presenta un buen desempeño, de acuerdo a la calidad de canal del escenario utilizado.

Este capítulo aborda la validación del simulador LTE, el diseño del algoritmo RME, adaptación de enlace clásico y mejorado y las variantes de asignación MCS que dan lugar a la asignación del índice de CQI. Además, se lleva a cabo el análisis teórico de la adaptación de enlace clásico y mejorado para después ser implementados en el simulador de LTE. Finalmente, se presentan los resultados de las pruebas de desempeño de los algoritmos (antes mencionados) diseñados e implementados en este capítulo.

## 4.2. Validación del simulador de LTE

Los resultados teóricos y simulados de LTE, se evalúan con el objetivo de validar el correcto funcionamiento del simulador de LTE Vienna a nivel de enlace v1.5.

### 4.2.1. Rendimiento teórico

El rendimiento teórico en ms (milisegundos) de LTE se calcula de la siguiente forma:

$$T(sym/ms) = Scs \times Simb\_OFDM \times RB \times RB\_Subframe, \quad (4.1)$$

donde  $T(sym/ms)$  es el rendimiento (*throughput*) en símbolos/ms;  $Scs$  son las 12 subportadoras contiguas correspondiente a un RB;  $Simb\_OFDM$  es el número de símbolos de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM, por sus siglas en inglés), con valor de siete;  $RB$  es el número de bloques de recursos que depende del ancho de banda solicitado y  $RB\_Subframe$  tiene un valor constante de dos, debido a que la asignación de recursos se realiza en dos ranuras (un *subframe*).

El rendimiento teórico en segundos se obtiene como sigue (considerando que hay 1000 subframes en un segundo):

$$T(sym/s) = \frac{T(sym/ms)}{1 \times 10^{-3}}, \quad (4.2)$$

donde  $T(sym/s)$  es el rendimiento en símbolos/segundos.

El rendimiento en bits/segundo de los 3 diferentes tipos de modulación, QPSK, 16QAM, y 64QAM es definido por las siguientes Ecuaciones 4.3, 4.4 y 4.5:

Para QPSK:

$$T\_QPKS = T(sym/s) \times 2 \text{ bits}, \quad (4.3)$$

Para 16QAM:

$$T\_16QAM = T(sym/s) \times 4 \text{ bits}, \quad (4.4)$$

Para 64QAM:

$$T\_64QAM = T(sym/s) \times 6 \text{ bits}. \quad (4.5)$$

De acuerdo con [72], el 25 % del rendimiento total es de control y señalización. Por lo tanto, al rendimiento estimado se le aplica un decremento del 25 %, como se define a continuación:

Para QPSK:

$$T\_QPSKEff = T\_QPSK - \frac{T\_QPSK \times 25}{100}, \quad (4.6)$$

Para 16QAM:

$$T_{16QAM}^{eff} = T_{16QAM} - \frac{T_{16QAM} \times 25}{100}, \quad (4.7)$$

Para 64QAM:

$$T_{64QAM}^{eff} = T_{64QAM} - \frac{T_{64QAM} \times 25}{100}. \quad (4.8)$$

#### 4.2.2. Análisis del rendimiento teórico

El análisis del rendimiento teórico se obtiene a través de las Ecuaciones 4.6, 4.7 y 4.8, para los tres tipos de modulaciones, QPSK, 16QAM y 64QAM, respectivamente. El rendimiento teórico de LTE fue evaluado para diferentes anchos de banda: 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz. La Figura 4.1 muestra el rendimiento teórico máximo con una modulación de 64QAM de 4.53, 11.34, 18.9, 37.8, 56.7 y 75.6 Mbps para los anchos de banda de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz, respectivamente.

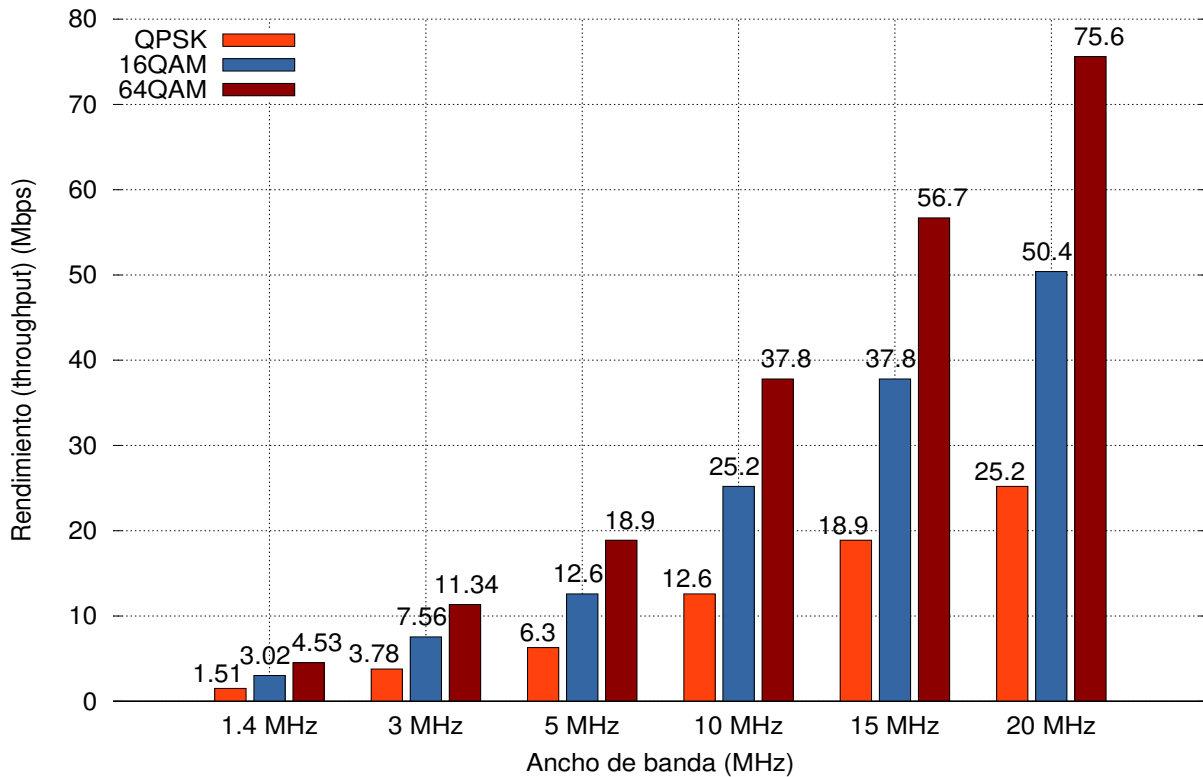


Figura 4.1: Rendimiento teórico de LTE del enlace de subida.

La [Tabla 4.1](#) muestra el concentrado del rendimiento teórico, para las diferentes modulaciones y anchos de banda de LTE. Los resultados muestran que el mínimo rendimiento se presenta en la modulación QPSK cuando utiliza un ancho de banda de 1.4 MHz. Debido a que la modulación QPSK y el ancho de banda de 1.4 MHz, asignan 2 bits y 6 RB al usuario, respectivamente.

Mod. \ BW	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
	6 RBs	15 RBs	25 RBs	50RBs	75RBs	100RBs
QPSK	1.512 Mbps	3.78 Mbps	6.3 Mbps	12.6 Mbps	18.9 Mbps	25.2 Mbps
16QAM	3.024 Mbps	7.56 Mbps	12.6 Mbps	25.2 Mbps	37.8 Mbps	50.4 Mbps
64QAM	4.536 Mbps	11.34 Mbps	18.9 Mbps	37.8 Mbps	56.7 Mbps	75.6 Mbps

[Tabla 4.1](#): Resultados de rendimiento teórico.

### 4.2.3. Análisis del rendimiento simulado

Para verificar el correcto funcionamiento del simulador de LTE, para el enlace de subida de Vienna v1.5, en esta subsección se reportan los resultados de las simulaciones, bajo los diferentes anchos de banda de LTE, con una configuración de salida única entrada única (SISO, por sus siglas en inglés). Además, un calendarizador propio con métrica de máximo rendimiento fue utilizado. Otro aspecto relevante del simulador es la configuración de un canal típico urbano, sin *multipath fading*, para no afectar significativamente el rendimiento de las simulaciones. El simulador fue configurado de tal forma que los resultados obtenidos fueran lo más cercano posible a los resultados teóricos.

Por otra parte, las simulaciones fueron evaluadas con diferentes valores para la relación señal a ruido (SNR, por sus siglas en inglés), con la finalidad de obtener el máximo rendimiento que proporciona el simulador de Vienna. Los parámetros utilizados en la simulación se muestran en la [Tabla 4.2](#). La [Figura 4.2](#) muestra el rendimiento del simulador LTE de Vienna v.1.5. Los resultados muestran que la tasa del rendimiento se incrementa de forma considerable en un intervalo de SNR de 0 dB a 30 dB, mientras que un intervalo de 30 dB a 40 dB muestra un crecimiento lento de la tasa del rendimiento y, finalmente, llega a un punto de saturación de 40 dB a 50 dB.

El rendimiento máximo del simulador LTE se logra en el punto de saturación de la Fig. 4.2, es decir, cuando se comporta de forma constante rendimiento. Bajo este contexto, los rendimientos resultantes simulados son los siguientes: 4.288, 10.768, 17.960, 35.944, 53.920 y 71.904 Mbps, para los anchos de banda de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz, respectivamente.

Parámetros	Valor
Ancho de banda	1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz
Número de eNB	1
Número de UE	1
Números de subframes (TTI)	5000
Modelo de canal	3GPP TU
Antena transmisora	1
Antena receptora	1
Tipo de receptor	MMSE
Calendarizador ( <i>Scheduler</i> )	Máximo <i>Throughput</i>

Tabla 4.2: Parámetros de simulación para el análisis de rendimiento del simulador.

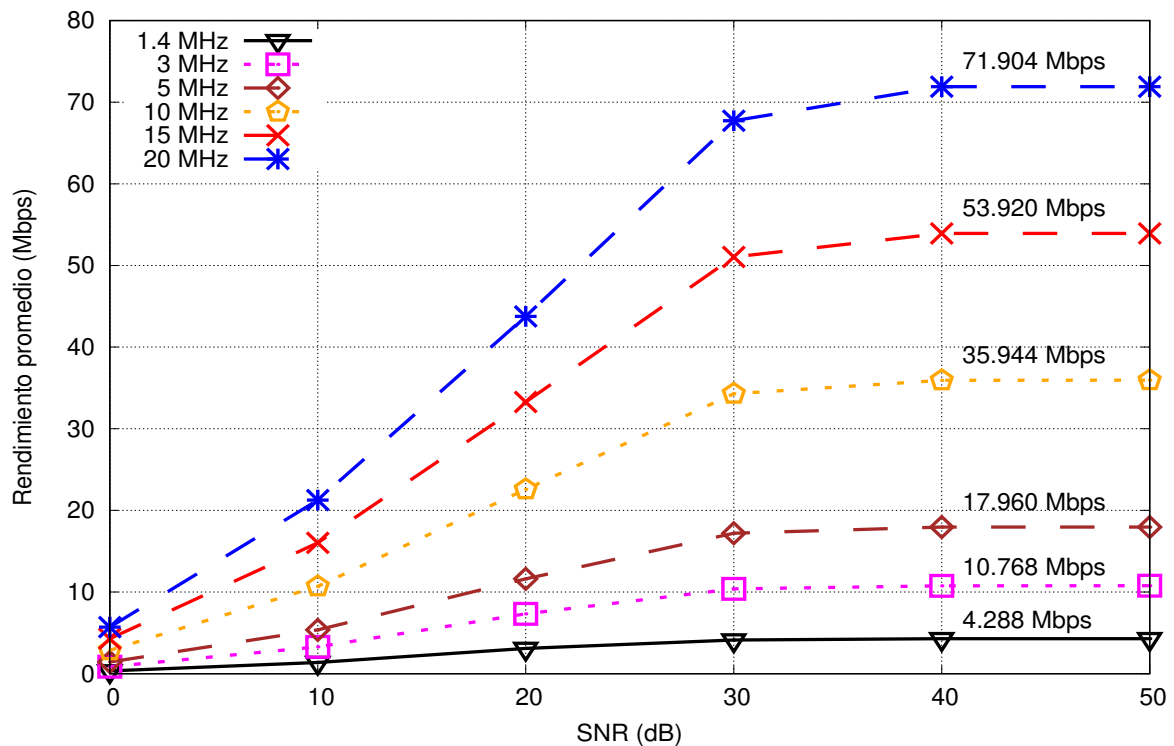


Figura 4.2: Rendimiento simulado de LTE del enlace de subida.



Con la finalidad de comparar el rendimiento teórico y simulado, se considera la técnica de modulación con el rendimiento máximo con las condiciones configuradas para el canal en ambos casos. Entonces, el rendimiento teórico considera el rendimiento de la modulación de 64QAM para los diferentes tipos de ancho de banda (ver [Tabla 4.1](#)) y el rendimiento simulado considera los rendimientos obtenidos en el punto de saturación de la [Fig. 4.2](#).

La [Tabla 4.3](#) muestra la comparación entre el rendimiento teórico y el rendimiento simulado. Los resultados muestran que existe un error porcentual del 5%. De acuerdo a los resultados obtenidos, el error porcentual no es significativo, considerando que los valores del error porcentual son menores al 10% y, por lo tanto, se considera una buena aproximación. Bajo esta premisa, el error del rendimiento simulado se encuentra en un rango aceptable del error porcentual.

<b>Rend.</b> \ <b>BW</b>	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Rendimiento teórico	4.536 Mbps	11.34 Mbps	18.9 Mbps	37.8 Mbps	56.7 Mbps	75.6 Mbps
Rendimiento simulado	4.288 Mbps	10.768 Mbps	17.960 Mbps	35.944 Mbps	53.920 Mbps	71.904 Mbps
Error porcentual	5.4 %	5.0 %	4.9 %	4.9 %	4.9 %	4.8 %

[Tabla 4.3](#): Comparación entre el rendimiento teórico y simulado.

De acuerdo con los resultados teóricos y los resultados simulados, el simulador presenta valores aceptables del rendimiento de LTE. Por tal motivo, el algoritmo de asignación de recursos, la adaptación de enlace y las variantes de la asignación del CQI presentados en este trabajo de tesis son implementados en el simulador de Vienna.

### 4.3. Diseño del algoritmo de asignación de recursos

De acuerdo a la literatura especializada, el algoritmo de asignación de recursos expansión máxima recursiva (RME, por sus siglas en inglés) ha sido analizado en simuladores a nivel de sistema. Esto significa que la capa física de LTE ha sido omitida en la evaluación de RME y, por consiguiente, también la adaptación de enlace de LTE. Sin embargo, el algoritmo de asignación de recursos en un sistema real de LTE requiere de dos parámetros cruciales: 1) la adaptación de enlace y 2) la matriz de estado del canal. Estos parámetros, siendo elementos de capa física, son asumidos en un simulador a nivel de sistema. Por esta razón, el simulador a nivel de enlace de LTE, para el enlace de subida, presentado en [33], [34], [62], es utilizado en este trabajo de tesis. La gran ventaja de utilizar un simulador a nivel de enlace es la manipulación de las subportadoras a nivel de bit y, por consiguiente, la posibilidad de analizar de forma detallada la degradación de las subportadoras a nivel de calidad de canal.

Otro aspecto crucial de la asignación de recursos se encuentra en la adaptación de enlace, el cual no se ha evaluado en conjunto con el algoritmo RME (de acuerdo a la literatura especializada). Por esta razón, el trabajo de investigación aquí presentado, se enfoca en reproducir el algoritmo RME, proponer variantes de asignación del índice de CQI y mejorar el módulo de adaptación de enlace clásico.

Un objetivo planteado al inicio de este trabajo de tesis está relacionado con el desperdicio de recursos de radio en escenarios de fluctuaciones rápidas y con diferentes valores de velocidades. En este sentido, la mejora de la adaptación de enlace y la asignación correcta del MCS aspira a producir un decremento considerable del desperdicio de recursos de radio en entornos vehiculares.

A continuación se describen los aspectos relevantes que presenta el algoritmo de asignación de recursos RME.

**El algoritmo RME presenta las siguientes características:**

- El algoritmo es del tipo heurístico.
- El algoritmo es dependiente del canal.
- El algoritmo está diseñado para asignar RB en el dominio de la frecuencia.
- El algoritmo considera la restricción de contigüidad de RB.

- El algoritmo presenta un buen rendimiento (en la literatura revisada). Por tal motivo, se considera como referencia en varios artículos de evaluación de desempeño referente al tema de asignación de recursos en LTE.

La restricción de contigüidad en la asignación de RB conduce a una búsqueda exhaustiva del mejor UE que origina algoritmos con problema de optimización de polinomio no determinístico complejo (NP-HARD, por sus siglas en inglés), y por consiguiente, diseños e implementaciones imprácticas en sistemas reales de LTE [48]. Por esta razón, los algoritmos heurísticos tienen la finalidad de encontrar una solución suficientemente buena a través de la simplicidad computacional. Debido a esto, los algoritmos del tipo heurístico presentan un buen rendimiento en diseños prácticos de la vida real [22].

Debido a las características antes mencionadas, el algoritmo heurístico RME es replicado en este trabajo de tesis.

#### 4.4. Puntos a considerar en el diseño del algoritmo

1. Reproducir el algoritmo RME en un simulador a nivel de enlace.
2. Estimación del primer parámetro de entrada utilizado por el algoritmo de asignación de recursos. Este parámetro está relacionado con la creación de la matriz de métricas del cociente efectivo de la potencia de la señal sobre interferencia más ruido (SINR, por sus siglas en inglés) derivado de la matriz del estado de canal. Este proceso lo ejecuta el nodo B mejorado (eNB, por sus siglas en inglés).
3. Estimación del segundo parámetro de entrada al algoritmo de asignación de recursos. Este parámetro está relacionado con la adaptación de enlace, para que el usuario sea capaz de realizar el mapeo SINR efectivo–CQI. Este proceso lo ejecuta el eNB.
4. El eNB envía los parámetros CQI, RB asignados, indicador de la matriz de precodificación (PMI, por sus siglas en inglés) e indicador de rango (RI, por sus siglas en inglés) a través de la información del estado de canal (CSI, por sus siglas en inglés) al equipo de usuario (UE, por sus siglas en inglés).

5. Con la información recibida del eNB, el UE realiza un mapeo del SINR efectivo con el índice de CQI correspondiente. El índice de CQI es aplicado a todos los RB que fueron asignados a el usuario. El resultado del mapeo SINR-CQI es utilizado como parámetro *bits\_modulacion* en la Ecuación 4.9 para calcular los *bits\_codificados*. Este proceso lo ejecuta el UE.

$$bits\_codificados = bits\_modulacion \times (RB\_asignados \times numero\_subportadoras \times numero\_simbolos - simbolos\_SRS - simbolos\_DMRS), \quad (4.9)$$

donde *bits\_modulacion* son los bits asignados, que depende del índice de CQI asignado; *RB\_asignados* son los RB asignados por algoritmo RME a un usuario considerando la restricción de contigüidad; *numero\_subportadoras* es el número de subportadoras (12 subportadoras) en el dominio de la frecuencia (ver Figura 4.3); *numero\_simbolos* es el número de símbolos en el dominio del tiempo (14 símbolos para un TTI) (ver Figura 4.3); y *simbolos\_SRS* es el número SRS (señal de referencia de sondeo) definido de la siguiente forma:

$$1 \text{ simbolo} \times 12 \text{ subportadoras} \times RB\_asignados;$$

*simbolos\_DMRS* es el número DMRS (señal de referencia de demodulación) definido de la siguiente forma:

$$2 \text{ simbolos} \times 12 \text{ subportadoras} \times RB\_asignados.$$

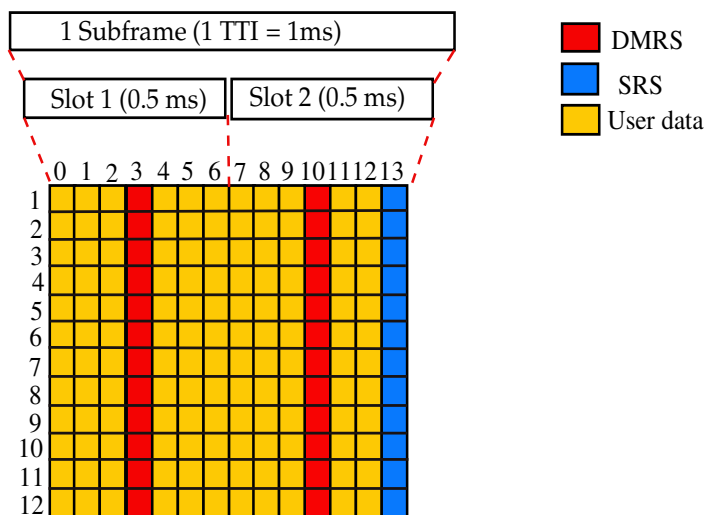


Figura 4.3: Asignación de señales de referencia en un subframe.

6. El UE calcula el número de bits que puede transmitir sobre sus RB asignados, a través de los siguientes parámetros: 1) asignación de RB, 2) bits de modulación y 3) tasa de codificación.

Una vez que el usuario calcula el número de bits a transmitir, el UE genera el bloque de transporte (TB, por sus siglas en inglés) y es enviado al eNB, a través del canal compartido de enlace ascendente físico (PUSCH, por sus siglas en inglés). El TB, al pasar por todos los bloques de procesamiento de señales, adquiere 24 bits de verificación de redundancia cíclica (CRC, por sus siglas en inglés), para la detección de errores, seguido de la segmentación de bloque de código <sup>1</sup> (CB, por sus siglas en inglés).

Finalmente, para ajustar la tasa de código y la tasa de bits, el usuario utiliza dos parámetros del MCS (con base en la información del CQI recibida del eNB): 1) El orden de la modulación (QPSK, 16 QAM y 64 QAM) y 2) tasa de código efectivo (ECR, por sus siglas en inglés). Con estos valores el UE ajusta la tasa de bits mediante la adaptación del valor del ECR [34] y, por consiguiente, también ajusta los bits de redundancia con la información transmitida por el UE.

El ECR se encuentra definido por la [Ecuación 4.10](#) [34].

$$ECR = 1024 \cdot \frac{C_R}{e_R}, \quad (4.10)$$

donde  $C_R$  es número de datos útiles + 24 bits del CRC y  $e_R$  es el número de bits codificados.

Sustituyendo  $C_R$  en la [Ecuación 4.10](#) se obtiene la [Ecuación 4.11](#).

$$ECR = 1024 \cdot \frac{\text{datos\_utiles} + 24}{e_R}, \quad (4.11)$$

despejando  $\text{datos\_utiles}$  de la [Ecuación 4.11](#) se obtiene la [Ecuación 4.12](#).

$$\text{datos\_utiles} = \frac{ECR \cdot e_R}{1024} - 24, \quad (4.12)$$

se tiene que  $e_R = \text{bits\_codificados}$  y, por lo tanto, se obtiene la [Ecuación 4.13](#).

---

<sup>1</sup>Existe la segmentación, si el tamaño del TB es mayor a 6144 bits.

$$datos\_utiles = \left( bits\_codificados \times \left[ \frac{ECR}{1024} \right] \right) - 24. \quad (4.13)$$

El parámetro *bits\_codificados* de la Ecuación 4.13 se obtiene mediante la Ecuación 4.9.

De acuerdo a las ecuaciones anteriormente mostradas, los parámetros orden de modulación (bits asignados al usuario) y número de RB asignados al UE, permiten calcular el valor del ECR y la tasa de datos útiles que determinan el tamaño del TB.

7. Obtener el rendimiento de la celda a través de la Ecuación 4.14

$$rendimiento = \frac{B}{t_{sim}}. \quad (4.14)$$

Donde B es el número de bits recibidos exitosamente sobre la interface de aire (del UE al eNB) y  $t_{sim}$  es el tiempo total de simulación.

En la siguiente sección, analizaremos el funcionamiento del algoritmo de asignación de recursos RME, el proceso de adaptación de enlace, clásico y mejorado, y las variantes de la asignación del índice de CQI.

## 4.5. Algoritmo RME

El algoritmo RME propuesto en la literatura fue evaluado, con una métrica de justicia proporcional (PF, por sus siglas en inglés), con la finalidad de asignar recursos a los usuarios que experimentan mala calidad de canal. En este trabajo de tesis se considera una métrica de SINR efectivo con el objetivo de asignar recursos a los usuarios que presentan buena calidad de canal en sus subportadoras.

A continuación se describe el funcionamiento del algoritmo RME de forma más detallada:

1. Búsqueda de la combinación UE-RB con el valor más alto de SINR efectivo en la matriz de métricas.
2. Realizar la primera asignación  $UE_0 - RB_0$ .
3. Expandir la asignación del  $UE_0$  (asignado en el paso 2) a los extremos derecho e izquierdo, hasta encontrar otro  $UE_i$  con mejor métrica (SINR efectivo).

4. Poner  $UE_0$  en modo inactivo, es decir, el usuario ya no puede solicitar RB.
5. Repetir los pasos 1-4, mientras se busca el máximo entre todos los UE activos, y se detiene cuando todos los UE están en modo inactivo o todos los RB han sido asignados.
6. Si aún existen RB sin asignar.
  - (a) Buscar la combinación  $UE_i - RB_j$  con el valor de SINR efectivo más alto entre todos los RB sobrantes.
  - (b) La asignación de  $RB_j$  se da cuando:
    - El  $RB_j$  es adyacente a los RB ya asignados al  $UE_i$  que se encuentra en modo inactivo.
    - Cuando el  $RB_j$  adyacente más próximo está lejos de los RB ya asignados al  $UE_i$ , se expande la asignación de un extremo hasta alcanzar la contigüidad y, del otro extremo, hasta encontrar otro  $i$ -UE (inactivo) con un valor de SINR efectivo más alto.
  - (c) Otro caso, repetir (a) y (b) y poner el  $j$ -RB en modo inactivo.

#### 4.5.1. Diagrama de flujo de RME

La [Figura 4.4](#) muestra el diagrama de flujo del algoritmo RME descrito arriba. El diagrama de flujo considera la búsqueda y asignación del mejor par RB-UE, sustentado en el valor más alto de SINR efectivo y la restricción de contigüidad. A continuación, se muestra un ejemplo de la ejecución del algoritmo RME, mediante la matriz de métricas derivada de la matriz de canal, la cual es obtenida a través del simulador LTE a nivel de enlace.

#### 4.5.2. Ejecución del algoritmo RME sobre la matriz de métricas

La generación de la matriz de métricas, derivada de la matriz del estado de canal se explica de forma detallada en la subsección de “Generación de la matriz del estado de canal”, del capítulo 2.

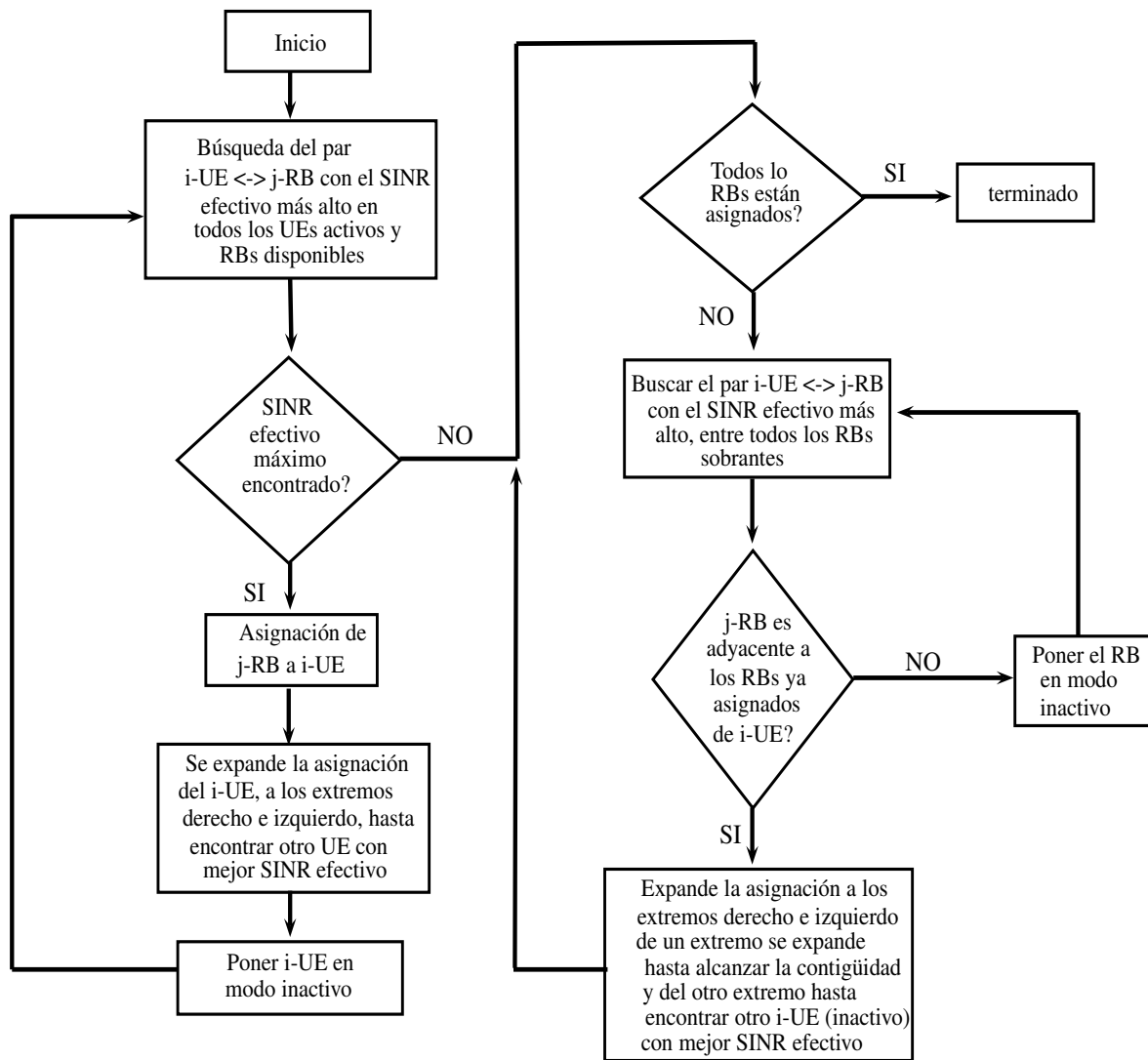


Figura 4.4: Diagrama de flujo del algoritmo RME [22].

La [Tabla 4.4](#) muestra la matriz de métricas obtenida a través del simulador LTE con las siguientes características: 3 usuarios, SNR de 10 dB, velocidad de 80 km/h, ancho de banda (BW, por sus siglas en inglés) de 3 MHz y un canal vehicular extendido del tipo A (EVehA, por sus siglas en inglés). El algoritmo RME busca el primer par RB-UE de valor máximo (SINR efectivo) y se asigna el RB11  $\rightarrow$  UE2, se expande la asignación a los extremos derecho e izquierdo, deteniéndose en el RB10 debido a que el valor del RB9-UE2 es menor con respecto al UE1-RB9 y UE3-RB9. Podemos observar que RB10, RB11, RB12, RB13, RB14 y RB15 son asignados al UE2 (debido a la expansión).



	RB1	RB2	RB3	RB4	RB5	RB6	RB7	RB8	RB9	RB10	RB11	RB12	RB13	RB14	RB15
UE1	7.03	11.76	7.89	4.41	10.77	10.43	3.37	10.47	14.58	9.52	7.28	13.35	9.24	0.97	2.72
UE2	3.53	3.51	2.91	4.89	7.46	6.63	9.63	8.93	6.43	19.81	40.36	38.53	37.93	39.74	25.03
UE3	1.44	3.29	4.37	6.83	4.14	7.30	11.02	12.59	13.15	11.53	9.16	4.86	8.45	7.47	6.52
										UE2	UE2	UE2	UE2	UE2	UE2

Tabla 4.4: Primera iteración, búsqueda del primer máximo.

La Tabla 4.5 muestra la siguiente iteración del algoritmo RME. Una vez que el UE2 ha sido calendarizado, se pone en modo inactivo y, enseguida, se bloquean los RB ya asignados (RB10, RB11, RB12, RB13, RB14, RB15). El algoritmo busca el par RB-UE de valor máximo entre los UE y RB activos. El algoritmo encuentra que el par RB9  $\rightarrow$  UE1 que tiene el valor máximo y, por lo tanto, el RB9 es asignado al UE1. El algoritmo intenta expandir la asignación a los extremos. Sin embargo, al extremo derecho, el RB10 se encuentra deshabilitado debido a que ya está bloqueado (RB ya asignado a otro usuario). Al extremo izquierdo, el par RB8  $\rightarrow$  UE1 presenta una métrica menor al par RB8  $\rightarrow$  UE3. Por tal motivo, la asignación al extremo izquierdo no puede expandirse y, por lo tanto, el UE1 solamente obtiene el RB9.

	RB1	RB2	RB3	RB4	RB5	RB6	RB7	RB8	RB9	RB10	RB11	RB12	RB13	RB14	RB15
UE1	7.03	11.76	7.89	4.41	10.77	10.43	3.37	10.47	14.58	0	0	0	0	0	0
UE2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UE3	1.44	3.29	4.37	6.83	4.14	7.30	11.02	12.59	13.15	0	0	0	0	0	0
									UE1	UE2	UE2	UE2	UE2	UE2	UE2

Tabla 4.5: Segunda iteración, el UE2 se pone en modo inactivo.

La Tabla 4.6 muestra la tercera iteración del algoritmo RME. Una vez que el UE1 ha sido calendarizado, se pone en modo inactivo y, enseguida, se bloquea el RB ya asignado (RB9). El algoritmo busca el par RB-UE de valor máximo entre los UE y RB activos. El algoritmo encuentra que el par RB8  $\rightarrow$  UE3 presenta el valor máximo de métrica y, por lo tanto, el RB8 es asignado al UE3. El algoritmo busca expandir su asignación al extremo derecho; los RB se encuentran bloqueados y, al extremo izquierdo, se expande hasta encontrar otro UE activo. Sin embargo, no existen usuarios activos y, por consiguiente, los RB: RB8, RB7, RB6, RB5, RB4, RB3, RB2, RB1 son asignados al UE3. Finalmente, los RB asignados a cada usuario quedan de la siguiente forma:

$$UE1 \rightarrow \{RB9\},$$

$$UE2 \rightarrow \{RB10, RB11, RB12, RB13, RB14, RB15\},$$

$$UE3 \rightarrow \{RB1, RB2, RB3, RB4, RB5, RB6, RB7, RB8\}.$$

	RB1	RB2	RB3	RB4	RB5	RB6	RB7	RB8	RB9	RB10	RB11	RB12	RB13	RB14	RB15
UE1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UE2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UE3	1.44	3.29	4.37	6.83	4.14	7.30	11.02	12.59	0	0	0	0	0	0	0
	UE3	UE3	UE3	UE3	UE3	UE3	UE3	UE3	UE1	UE2	UE2	UE2	UE2	UE2	UE2

Tabla 4.6: Tercera iteración, el UE1 se pone en modo inactivo.

De acuerdo a los resultados obtenidos, los RB son asignados al usuario que presenta una mejor calidad de canal y cumple con la restricción de contigüidad en la asignación de los RB. El análisis de la ejecución del algoritmo RME en el simulador de Matlab se muestra en las Tablas 4.4, 4.5, y 4.6.

## 4.6. Análisis teórico de la adaptación de enlace clásico

El simulador de LTE, a nivel de enlace v1.5, permite la manipulación y análisis de las subportadoras. Es el único simulador en la literatura que tiene implementado todos los módulos de procesamiento de señales para llevar a cabo el proceso de la adaptación de enlace [33], [34], [62]. De acuerdo a la literatura revisada en el estado del arte, se ha encontrado que los artículos de investigación en relación con el tema, no abordan el tema de la adaptación de enlace a nivel de capa física. Por esta razón, uno de las aportaciones de esta tesis es abordar el tema de la adaptación de enlace clásico.

De la sección anterior, se retoma la información de la asignación de RB a los usuarios.

$$UE1 \rightarrow \{RB9\},$$

$$UE2 \rightarrow \{RB10, RB11, RB12, RB13, RB14, RB15\},$$

$$UE3 \rightarrow \{RB1, RB2, RB3, RB4, RB5, RB6, RB7, RB8\}.$$

Las subportadoras asignadas a cada usuario se muestra en la Tabla 4.7, junto con los índices de las subportadoras de los RB asignados a los usuarios. La información mostrada en la Tabla 4.7 se toma como punto de partida para la mejor comprensión del sistema de ecuaciones 4.15 de la adaptación de enlace clásico. Cada usuario tiene su propia matriz de métricas ( $\mathbf{MM}$ ), derivada de la matriz de la calidad de canal. En estas circunstancias, el número total de subportadoras promedio ( $\overline{\mathbf{SC}}$ ) para cada matriz de métricas es de 180 subportadoras (BW de 3 MHz y 15 RB) por usuario y cada RB está compuesto de 12 subportadoras contiguas, como se muestra en el sistema de ecuaciones 4.15.

RB	UE	índice de subportadoras
RB1	UE3	1-12
RB2	UE3	13-24
RB3	UE3	25-36
RB4	UE3	37-48
RB5	UE3	49-60
RB6	UE3	61-72
RB7	UE3	73-84
RB8	UE3	85-96
RB9	UE1	97-108
RB10	UE2	109-120
RB11	UE2	121-132
RB12	UE2	133-144
RB13	UE2	145-156
RB14	UE2	157-168
RB15	UE2	169-180

Tabla 4.7: Asignación de RBs a los UEs con respecto al índice de subportadoras.

$$MM_{UE1} = \begin{bmatrix} \overline{SC}_1 \\ \overline{SC}_2 \\ \vdots \\ \overline{SC}_{95} \\ \overline{SC}_{96} \\ \overline{SC}_{97} \\ \vdots \\ \overline{SC}_{108} \\ \overline{SC}_{109} \\ \vdots \\ \overline{SC}_{180} \end{bmatrix}, MM_{UE2} = \begin{bmatrix} \overline{SC}_1 \\ \overline{SC}_2 \\ \vdots \\ \overline{SC}_{95} \\ \overline{SC}_{96} \\ \overline{SC}_{97} \\ \vdots \\ \overline{SC}_{108} \\ \overline{SC}_{109} \\ \vdots \\ \overline{SC}_{180} \end{bmatrix}, MM_{UE3} = \begin{bmatrix} \overline{SC}_1 \\ \overline{SC}_2 \\ \vdots \\ \overline{SC}_{95} \\ \overline{SC}_{96} \\ \overline{SC}_{97} \\ \vdots \\ \overline{SC}_{108} \\ \overline{SC}_{109} \\ \vdots \\ \overline{SC}_{180} \end{bmatrix}. \quad (4.15)$$

La ecualización en el dominio de la frecuencia (Ecuación 4.16) es aplicado al sistema de ecuaciones 4.15. Por lo tanto, el sistema de ecuaciones resultante es presentado en 4.17.

$$F = \frac{H^*(k)}{H(k)H^*(k) + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_x^2}}, \quad (4.16)$$

$$\mathbf{F}_{\text{UE1}} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} \overline{SC}_{97} \\ \vdots \\ \overline{SC}_{108} \end{bmatrix}, \mathbf{F}_{\text{UE2}} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} \overline{SC}_{109} \\ \vdots \\ \overline{SC}_{180} \end{bmatrix}, \mathbf{F}_{\text{UE3}} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} \overline{SC}_1 \\ \overline{SC}_2 \\ \vdots \\ \overline{SC}_{95} \\ \overline{SC}_{96} \end{bmatrix}. \quad (4.17)$$

Con el objetivo de obtener la dispersión (post-demodulación) del SINR, en cada una de las subportadoras asignadas a cada usuario, se aplica la ecuación SINR-SC-FDMA (Ecuación 4.18) al sistema de ecuaciones 4.17. Por consiguiente, 4.19 es el sistema de ecuaciones resultante.

$$\begin{aligned} \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}} &= \\ &= \frac{\frac{\sigma_x^2}{N_{SC}} |\text{diag}(\mathbf{FH})|^2}{\sigma_x^2 \|\mathbf{FH}\|^2 - \frac{\sigma_x^2}{N_{SC}} |\text{diag}(\mathbf{FH})|^2 + \mathbf{F}^T \mathbf{F} + (\sigma_n^2) \|\text{diag}(\mathbf{F})\|^2}, \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\text{SINR}_{\text{UE1}}^{\text{SC-FDMA}} = \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}} \begin{bmatrix} F_{97} \\ \vdots \\ F_{108} \end{bmatrix}, \text{SINR}_{\text{UE2}}^{\text{SC-FDMA}} = \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}} \begin{bmatrix} F_{109} \\ \vdots \\ F_{180} \end{bmatrix},$$

$$\text{SINR}_{\text{UE3}}^{\text{SC-FDMA}} = \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_{95} \\ F_{96} \end{bmatrix}. \quad (4.19)$$

Para comprimir las subportadoras y obtener un valor único de SINR, se aplica la ecuación del mapeo del SINR efectivo exponencial (EESM, por sus siglas en inglés) (Ecuación 4.20) o, en su defecto, el mapeo de SINR exponencial con base en información mutua (MIESM, por sus siglas en inglés) (Ecuación 4.21), al sistema de ecuaciones 4.19. Por consiguiente, se obtiene el sistema de ecuaciones 4.22.

$$SINR_{eff} = EESM(SINR, \beta) = -\beta \ln \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{-\frac{SINR_i}{\beta}} \right), \quad (4.20)$$

$$SINR_{eff} = MIESM(SINR, I) = I^{-1} \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(SINR_i) \right). \quad (4.21)$$

$$SINR\_Efec_{UE1} = SINR\_Efec \begin{bmatrix} SINR_{97}^{SC-FDMA} \\ \vdots \\ SINR_{108}^{SC-FDMA} \end{bmatrix},$$

$$SINR\_Efec_{UE2} = SINR\_Efec \begin{bmatrix} SINR_{109}^{SC-FDMA} \\ \vdots \\ SINR_{180}^{SC-FDMA} \end{bmatrix}, \quad (4.22)$$

$$SINR\_Efec_{UE3} = SINR\_Efec \begin{bmatrix} SINR_1^{SC-FDMA} \\ SINR_2^{SC-FDMA} \\ \vdots \\ SINR_{95}^{SC-FDMA} \\ SINR_{96}^{SC-FDMA} \end{bmatrix},$$

donde el SINR efectivo (valor único de SINR) es el valor resultante del sistema de ecuaciones 4.22. Por consiguiente, es posible realizar el mapeo CQI-SINR para determinar el índice de CQI. El mapeo consiste en tomar los valores de la Tabla 4.8, para asignar el índice de CQI, de acuerdo al sistema de ecuaciones 4.23.

$$\begin{aligned} \text{Indice\_CQI}_{\text{UE1}} &= \left[ \text{SINR\_Effec}_{\text{UE1}} \right], \\ \text{Indice\_CQI}_{\text{UE2}} &= \left[ \text{SINR\_Effec}_{\text{UE2}} \right], \\ \text{Indice\_CQI}_{\text{UE3}} &= \left[ \text{SINR\_Effec}_{\text{UE3}} \right]. \end{aligned} \tag{4.23}$$

SINR (dB)	CQI	Modulación	Tasa de codificación	Bits/REs
-7.0 → -5.0	1	QPSK	0.0761	0.1523
-5.0 → -3.0	2	QPSK	0.1172	0.2344
-3.0 → -1.0	3	QPSK	0.1884	0.3770
-1.0 → +1.0	4	QPSK	0.3008	0.6016
+1.0 → +3.0	5	QPSK	0.4384	0.8770
+3.0 → +5.0	6	QPSK	0.5879	1.1758
+5.0 → +7.0	7	16QAM	0.3691	1.4766
+7.0 → +8.5	8	16QAM	0.4785	1.9141
+8.5 → +10.0	9	16QAM	0.6015	2.4063
+10.0 → +11.5	10	64QAM	0.4550	2.7305
+11.5 → +13.5	11	64QAM	0.5537	3.3223
+13.5 → +15.0	12	64QAM	0.6504	3.9023
+15.0 → +17.0	13	64QAM	0.7539	4.5234
+17.0 → +19.5	14	64QAM	0.8525	5.1152
>+19.5 →	15	64QAM	0.9258	5.5546

Tabla 4.8: Mapeo de SINR a CQI para el enlace de subida de LTE [30].

### 4.6.1. Análisis de la adaptación de enlace clásico en el simulador LTE

De acuerdo con el sistema de ecuaciones 4.15, cada usuario obtiene sus subportadoras con base a los RB asignados por el algoritmo de asignación de recursos RME. Por consiguiente, la posición de las 12 subportadoras contiguas asignadas a cada usuario se muestra en la [Tabla 4.9](#).

UE1	subportadoras	UE2	subportadoras	UE3	subportadoras
UE1	1-12	UE2	1-12	UE3	1-12
UE1	13-24	UE2	13-24	UE3	13-24
UE1	25-36	UE2	25-36	UE3	25-36
UE1	37-48	UE2	37-48	UE3	37-48
UE1	49-60	UE2	49-60	UE3	49-60
UE1	61-72	UE2	61-72	UE3	61-72
UE1	73-84	UE2	73-84	UE3	73-84
UE1	85-96	UE2	85-96	UE3	85-96
UE1	97-108	UE2	97-108	UE3	97-108
UE1	109-120	UE2	109-120	UE3	109-120
UE1	121-132	UE2	121-132	UE3	121-132
UE1	133-144	UE2	133-144	UE3	133-144
UE1	145-156	UE2	145-156	UE3	145-156
UE1	157-168	UE2	157-168	UE3	157-168
UE1	169-180	UE2	169-180	UE3	169-180

[Tabla 4.9](#): Subportadoras asignadas a cada usuario.

De la [Tabla 4.9](#) se puede observar que cada usuario cuenta con 180 subportadoras debido al ancho de banda de LTE utilizado ( $15 \text{ RB} \rightarrow 180 \text{ subportadoras}$ ).

$$UE1 \rightarrow \{RB9\} \Rightarrow \{SC_{97} \dots SC_{108}\},$$

$$UE2 \rightarrow \{RB10, RB11, RB12, RB13, RB14, RB15\} \Rightarrow \{SC_{109} \dots SC_{180}\},$$

$$UE3 \rightarrow \{RB1, RB2, RB3, RB4, RB5, RB6, RB7, RB8\} \Rightarrow \{SC_1 \dots SC_{96}\}.$$

Con el objetivo de obtener el valor único de SINR efectivo, el simulador efectúa todo el proceso de adaptación de enlace clásico a todas las subportadoras contiguas asignadas al UE1, mediante las Ecuaciones 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 y 4.22. El resultado del procesamiento de las subportadoras asignadas a el UE1 se muestra en la Tabla 4.10.

La Tabla 4.10 muestra un SINR efectivo resultante equivalente a 11.63 dB. Con este valor se determina la adaptación de enlace, a través de la Ecuación 4.23. Finalmente, el mapeo SINR-CQI se realiza de acuerdo con la Tabla 4.8.

Subportadoras	Post- demod	SINR efectivo	MCS
97	14.57	11.63 dB	CQI 11 64 QAM bits mod. = 6 CR x 1024 = 567
98	14.57		
99	14.57		
100	14.57		
101	14.57		
102	14.57		
103	14.57		
104	14.57		
105	14.57		
106	14.57		
107	14.57		
108	14.57		

Tabla 4.10: SINR efectivo y adaptación de enlace del UE1.

La Tabla 4.10 presenta el resultado de la post-demodulación y el SINR efectivo del UE1. Es importante remarcar que la post-demodulación presenta el mismo valor para todas las subportadoras asignadas al UE1. Después, se obtiene un valor único de SINR efectivo, mediante la aplicación de la técnica de procesamiento EESM a los valores resultantes de la post-demodulación. Finalmente, el MCS es obtenido a través del mapeo SINR efectivo-CQI. Este proceso constituye la forma clásica de obtener el esquema de MCS en el sistema LTE [33], [34], [62].



El mismo proceso se realiza para el UE2 y el UE3. Las subportadoras asignadas son  $SC_{109} - SC_{180}$  y  $SC_1 - SC_{96}$  al UE2 y UE3, respectivamente. Las asignación de subportadoras se muestran en las [Tablas 4.11](#) (UE2) y [4.12](#) (UE3).

Sub.	P-dem.	Sub.	P-dem.	Sub.	P-dem.	Sub.	P-dem.	SINR efec.	MCS
109	31.22	127	31.22	145	31.22	163	31.22	14.94 dB	CQI 12 64 QAM bits mod. = 6 CR x 1024 = 666
110	31.22	128	31.22	146	31.22	164	31.22		
111	31.22	129	31.22	147	31.22	165	31.22		
112	31.22	130	31.22	148	31.22	166	31.22		
113	31.22	131	31.22	149	31.22	167	31.22		
114	31.22	132	31.22	150	31.22	168	31.22		
115	31.22	133	31.22	151	31.22	169	31.22		
116	31.22	134	31.22	152	31.22	170	31.22		
117	31.22	135	31.22	153	31.22	171	31.22		
118	31.22	136	31.22	154	31.22	172	31.22		
119	31.22	137	31.22	155	31.22	173	31.22		
120	31.22	138	31.22	156	31.22	174	31.22		
121	31.22	139	31.22	157	31.22	175	31.22		
122	31.22	140	31.22	158	31.22	176	31.22		
123	31.22	141	31.22	159	31.22	177	31.22		
124	31.22	142	31.22	160	31.22	178	31.22		
125	31.22	143	31.22	161	31.22	179	31.22		
126	31.22	144	31.22	162	31.22	180	31.22		

[Tabla 4.11](#): SINR efectivo y adaptación de enlace del UE2.

Es importante remarcar que la adaptación de enlace clásico se enfoca solamente en las subportadoras de los RB asignadas al UE. Por esta razón, el resultado de la post-demodulación muestra el mismo valor en todas las subportadoras del usuario y, por consiguiente, un valor único de SINR efectivo.

Las [Tablas 4.10](#), [4.11](#) y [4.12](#) son el resultado de aplicar todo el análisis teórico desarrollado en la [sección 4.6](#).

Sub.	P-dem.	Sub.	P-dem.	Sub.	P-dem.	Sub.	P-dem.	SINR efec.	MCS
1	4.60	25	4.60	49	4.60	73	4.60	6.62 dB	CQI 7 16 QAM bits mod. = 4 CR x 1024 = 378
2	4.60	26	4.60	50	4.60	74	4.60		
3	4.60	27	4.60	51	4.60	75	4.60		
4	4.60	28	4.60	52	4.60	76	4.60		
5	4.60	29	4.60	53	4.60	77	4.60		
6	4.60	30	4.60	54	4.60	78	4.60		
7	4.60	31	4.60	55	4.60	79	4.60		
8	4.60	32	4.60	56	4.60	80	4.60		
9	4.60	33	4.60	57	4.60	81	4.60		
10	4.60	34	4.60	58	4.60	82	4.60		
11	4.60	35	4.60	59	4.60	83	4.60		
12	4.60	36	4.60	60	4.60	84	4.60		
13	4.60	37	4.60	61	4.60	85	4.60		
14	4.60	38	4.60	62	4.60	86	4.60		
15	4.60	39	4.60	63	4.60	87	4.60		
16	4.60	40	4.60	64	4.60	88	4.60		
17	4.60	41	4.60	65	4.60	89	4.60		
18	4.60	42	4.60	66	4.60	90	4.60		
19	4.60	43	4.60	67	4.60	91	4.60		
20	4.60	44	4.60	68	4.60	92	4.60		
21	4.60	45	4.60	69	4.60	93	4.60		
22	4.60	46	4.60	70	4.60	94	4.60		
23	4.60	47	4.60	71	4.60	95	4.60		
24	4.60	48	4.60	72	4.60	96	4.60		

Tabla 4.12: SINR efectivo y adaptación de enlace del UE3.

Para llevar a cabo la adaptación de enlace clásico, es crucial identificar el índice o posición de las subportadoras contiguas asignadas a los usuarios. Esto con el objetivo de obtener el SINR efectivo para definir la cantidad de bits que puede transportar el RB.

La [Tabla 4.13](#) muestra el resultado de la adaptación de enlace clásico para cada usuario. El eNB transmite esta información, a los UE correspondientes, sobre el canal de control físico de enlace de bajada (PDCCH, por sus siglas en inglés). Después, cada usuario calcula la cantidad de bits de datos que el TB puede transportar.

Usuario	RBs asignados	MCS
UE1	1	CQI 11 64 QAM bits mod. = 6 CR x 1024 = 567
UE2	6	CQI 12 64 QAM bits mod. = 6 CR x 1024 = 666
UE3	8	CQI 7 16 QAM bits mod. = 4 CR x 1024 = 378

[Tabla 4.13](#): Información de asignación de recursos a los usuarios.

Retomando las ecuaciones analizadas en la [sección 4.4](#), para determinar los datos útiles que puede transmitir el UE, se tiene lo siguiente:

$$bits\_codificados = bits\_modulacion \times (RB\_asignados \times numero\_subportadoras \\ \times numero\_simbolos - simbolos\_SRS - simbolos\_DMRS),$$

$$bits\_datos = \left( bits\_codificados \times \left[ \frac{ECR}{1024} \right] \right) - 24.$$

Con la información resultante de la asignación de recursos, la adaptación de enlace y la asignación del índice de CQI, el usuario determina los valores de bits codificados y bits de datos que puede utilizar para transmitir su información. A continuación se muestran los cálculos realizados por los usuarios.

**Operaciones realizadas por el UE1 en 1 TTI:**

$$bits\_codificados = 6 \times (1 \times 12 \times 14 - 12 \times 1 - 24 \times 1) = 792 \text{ bits},$$

$$bits\_datos = 8 \times round\left(\frac{1}{8} \times 792 \times \frac{567}{1024}\right) - 24 = 416 \text{ bits},$$

calculando la redundancia del UE1:

$$792 - 416 = 376 \text{ bits}.$$

Por lo tanto, el UE 1 puede transmitir 416 bits de información útil en 1 ms (1 TTI) y 376 bits corresponden a la información de redundancia.

**Operaciones realizadas por el UE2 en 1 TTI:**

$$bits\_codificados = 6 \times (6 \times 12 \times 14 - 12 \times 6 - 24 \times 6) = 4752 \text{ bits},$$

$$bits\_datos = 8 \times round\left(\frac{1}{8} \times 4752 \times \frac{666}{1024}\right) - 24 = 3064 \text{ bits},$$

calculando la redundancia del UE2:

$$4752 - 3064 = 1688 \text{ bits}.$$

Por lo tanto, el UE 2 puede transmitir 3064 bits de información útil en 1 ms (1 TTI) y 1688 bits corresponden a la información de redundancia.

**Operaciones realizadas por el UE3 en 1 TTI:**

$$bits\_codificados = 4 \times (8 \times 12 \times 14 - 12 \times 8 - 24 \times 8) = 4224 \text{ bits},$$

$$bits\_datos = 8 \times round\left(\frac{1}{8} \times 4224 \times \frac{378}{1024}\right) - 24 = 1536 \text{ bits},$$

calculando la redundancia del UE3:

$$4224 - 1536 = 2688 \text{ bits}.$$

Por lo tanto, el UE 3 puede transmitir 1536 bits de información útil en 1 ms (1 TTI) y 2688 bits corresponden a la información de redundancia.

La [Tabla 4.14](#) muestra un concentrado de los parámetros de bits de datos, bits de redundancia, RB asignados y la asignación del índice CQI (MCS) para cada usuario.

Usuario	Bits de datos	Redundancia	RB asignados	MCS
UE1	416	376	1	CQI 11 64 QAM bits mod. = 6 CR x 1024 = 567
UE2	3064	1688	6	CQI 12 64 QAM bits mod. = 6 CR x 1024 = 666
UE3	1536	2688	8	CQI 7 16 QAM bits mod. = 4 CR x 1024 = 378

[Tabla 4.14](#): Bits de datos asignados a los usuarios.

### 4.6.2. Conclusiones referente a la adaptación de enlace clásico

A partir de los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

- A mayor cantidad de RB, con un menor índice de CQI asignado al usuario, la redundancia representa una proporción considerable. Por ejemplo, para el UE3 con 8 RB y un CQI de 7, los bits útiles de información son 1536 bits y los bits de redundancia son 2688 bits.
- Cuando un usuario obtiene una cantidad reducida de RB, el usuario puede obtener un alto índice de CQI y, por consiguiente, una mayor cantidad de bits asignados. Sin embargo, existe una alta probabilidad de perder los RB durante el enlace de comunicación debido a que solo le fueron asignados pocos RB y, por consiguiente, un desperdicio considerable de bits asignados al usuario. Por ejemplo, el UE1 con un 1 RB obtiene un alto índice de CQI de 11.

Finalmente, el usuario transmite su información con base en la información presentada en la [Tabla 4.14](#).

Por su parte, la [Tabla 4.15](#) muestra los bits transmitidos por el usuario y los bits recibidos por el eNB bajo un canal vehicular extendido, SNR de 10 dB y 1 TTI. Los resultados presentados muestran que el UE1 con 1 RB y un CQI de 11 no fue recibido exitosamente por el eNB. Esto significa que el RB se perdió durante el enlace de comunicación, mientras que el UE2 y el UE3 presentan una transmisión exitosa.

Usuario	Bits transmitidos	Bits recibidos	Rendimiento usuario	Rendimiento celda
UE1	416	0	0	4600
UE2	3064	3064	3064	
UE3	1536	1536	1536	

[Tabla 4.15](#): Rendimiento de los usuarios con un SNR de 10 dB, y 1 TTI.

Un aspecto relevante está relacionado con la post-demodulación, la cual es aplicada a todo el grupo de subportadoras asignadas a un usuario. Los resultados presentados en las [Tablas 4.10](#), [4.11](#) y [4.12](#) muestran que el valor resultante de la post-demodulación es el mismo en todas la subportadoras asignadas a un usuario.

La Tabla 4.16 muestra valores de post-demodulación de 14.57, 31.22 y 4.60 para las subportadoras asignadas al UE1, UE2 y UE3, respectivamente.

Usuario	Subportadoras asignadas	Post-Demod.
UE1	$SC_{97} - SC_{108}$	14.57
UE2	$SC_{109} - SC_{180}$	31.22
UE3	$SC_1 - SC_{96}$	4.60

Tabla 4.16: Resultados de post-demodulación.

A partir de los resultados de la post-demodulación directa al grupo de subportadoras asignadas a un usuario, se concluye lo siguiente:

- Cuando el número de subportadoras con mejor calidad de canal es mayor al número de subportadoras con mala calidad de canal, la asignación de CQI será alto, debido a que predominan las subportadoras con buena calidad de canal. Por lo tanto, las subportadoras con mala calidad de canal obtienen un número significativo de bits que no pueden transportar exitosamente.

La forma de obtener la post-demodulación conduce a una degradación del rendimiento de LTE y desperdicio de los recursos de radio. Por tal motivo, la post-demodulación del enlace clásico es crítica en escenarios vehicular-infraestructura del sistema LTE, debido a los bajos valores de SNR que el canal experimenta.

## 4.7. Análisis teórico de adaptación de enlace mejorado

La adaptación de enlace mejorado propuesto en este trabajo de tesis, está diseñado de tal forma que las subportadoras asignadas a un usuario sean agrupadas para obtener una mejor dispersión de las subportadoras. Esto significa que las subportadoras con el valor más alto de SINR afectarán a un grupo reducido de subportadoras con el valor de SINR más bajo y, por lo tanto, LTE tendrá un menor desperdicio de recursos de radio. En otro caso, si un grupo de subportadoras presenta mala calidad de canal, el grupo obtendrá un valor bajo del SINR efectivo y, por consiguiente, un valor de bajo del índice de CQI. Por las razones antes mencionadas, la técnica mejorada presenta mejor MCS que la técnica clásica.

La idea principal de la técnica de la adaptación de enlace mejorado inicia con la aplicación de la post-demodulación a cada grupo de 12 subportadoras contiguas (de forma localizada). El resultado de aplicar la post-demodulación a un grupo determinado de subportadoras se refleja solamente en un conjunto de 12 subportadoras (es decir, el mismo valor en las 12 subportadoras) y, enseguida, se aplica el algoritmo EESM o MIESM para obtener el SINR efectivo. Las subportadoras asignadas a cada usuario con respecto a su matriz de métricas se define en el sistema de ecuaciones 4.24.

$$MM_{UE1} = \begin{bmatrix} \overline{SC}_1 \\ \overline{SC}_2 \\ \vdots \\ \overline{SC}_{95} \\ \overline{SC}_{96} \\ \overline{SC}_{97} \\ \vdots \\ \overline{SC}_{108} \\ \overline{SC}_{109} \\ \vdots \\ \overline{SC}_{180} \end{bmatrix}, MM_{UE2} = \begin{bmatrix} \overline{SC}_1 \\ \overline{SC}_2 \\ \vdots \\ \overline{SC}_{95} \\ \overline{SC}_{96} \\ \overline{SC}_{97} \\ \vdots \\ \overline{SC}_{108} \\ \overline{SC}_{109} \\ \vdots \\ \overline{SC}_{180} \end{bmatrix}, MM_{UE3} = \begin{bmatrix} \overline{SC}_1 \\ \overline{SC}_2 \\ \vdots \\ \overline{SC}_{95} \\ \overline{SC}_{96} \\ \overline{SC}_{97} \\ \vdots \\ \overline{SC}_{108} \\ \overline{SC}_{109} \\ \vdots \\ \overline{SC}_{180} \end{bmatrix}. \quad (4.24)$$

Se crean grupos de 12 subportadoras contiguas de las subportadoras asignadas a cada usuario, como se define en el sistema de ecuaciones 4.25.

$$MM_{UE1} = \begin{bmatrix} \overline{SC}_{97} \dots \overline{SC}_{108} \end{bmatrix}, MM_{UE2} = \begin{bmatrix} \overline{SC}_{109} \dots \overline{SC}_{120} \\ \overline{SC}_{121} \dots \overline{SC}_{132} \\ \overline{SC}_{133} \dots \overline{SC}_{144} \\ \overline{SC}_{145} \dots \overline{SC}_{156} \\ \overline{SC}_{157} \dots \overline{SC}_{168} \\ \overline{SC}_{169} \dots \overline{SC}_{180} \end{bmatrix}, MM_{UE3} = \begin{bmatrix} \overline{SC}_1 \dots \overline{SC}_{12} \\ \overline{SC}_{13} \dots \overline{SC}_{24} \\ \overline{SC}_{25} \dots \overline{SC}_{36} \\ \overline{SC}_{37} \dots \overline{SC}_{48} \\ \overline{SC}_{49} \dots \overline{SC}_{60} \\ \overline{SC}_{61} \dots \overline{SC}_{72} \\ \overline{SC}_{73} \dots \overline{SC}_{84} \\ \overline{SC}_{85} \dots \overline{SC}_{96} \end{bmatrix}. \quad (4.25)$$



Se aplica la ecualización en el dominio de la frecuencia a cada grupo de subportadoras de cada usuario, como se define en el sistema de ecuaciones 4.26.

$$\mathbf{F}[\mathbf{MM}_{\mathbf{UE1}}] = \left[ \mathbf{F}[\overline{SC}_{97} \dots \overline{SC}_{108}] \right], \mathbf{F}[\mathbf{MM}_{\mathbf{UE2}}] = \begin{bmatrix} \mathbf{F}[\overline{SC}_{109} \dots \overline{SC}_{120}] \\ \mathbf{F}[\overline{SC}_{121} \dots \overline{SC}_{132}] \\ \mathbf{F}[\overline{SC}_{133} \dots \overline{SC}_{144}] \\ \mathbf{F}[\overline{SC}_{145} \dots \overline{SC}_{156}] \\ \mathbf{F}[\overline{SC}_{157} \dots \overline{SC}_{168}] \\ \mathbf{F}[\overline{SC}_{169} \dots \overline{SC}_{180}] \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}[\mathbf{MM}_{\mathbf{UE3}}] = \begin{bmatrix} \mathbf{F}[\overline{SC}_1 \dots \overline{SC}_{12}] \\ \mathbf{F}[\overline{SC}_{13} \dots \overline{SC}_{24}] \\ \mathbf{F}[\overline{SC}_{25} \dots \overline{SC}_{36}] \\ \mathbf{F}[\overline{SC}_{37} \dots \overline{SC}_{48}] \\ \mathbf{F}[\overline{SC}_{49} \dots \overline{SC}_{60}] \\ \mathbf{F}[\overline{SC}_{61} \dots \overline{SC}_{72}] \\ \mathbf{F}[\overline{SC}_{73} \dots \overline{SC}_{84}] \\ \mathbf{F}[\overline{SC}_{85} \dots \overline{SC}_{96}] \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

La post-demodulación específica de SC-FDMA es aplicada a cada grupo de subportadoras de cada usuario (ya ecualizadas), como se define en el sistema de ecuaciones 4.27.

El sistema de ecuaciones 4.27 muestra que, al aplicar la post-demodulación a cada grupo de 12 subportadoras contiguas de un usuario, se obtendrán diferentes valores de post-demodulación para cada usuario; a diferencia de la técnica clásica que solamente obtiene un valor de post-demodulación para cada usuario. Esto significa que existe una mejor asignación del índice de CQI y MCS en la técnica de adaptación de enlace mejorada que en la técnica de adaptación de enlace clásica.

$$\begin{aligned}
\text{SINR}_{\text{UE1}}^{\text{SC-FDMA}} &= \left[ \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}}[\mathbf{F}_1(97) \dots \mathbf{F}_{12}(108)] \right], \\
\text{SINR}_{\text{UE2}}^{\text{SC-FDMA}} &= \begin{bmatrix} \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}}[\mathbf{F}_1(109) \dots \mathbf{F}_{12}(120)] \\ \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}}[\mathbf{F}_1(121) \dots \mathbf{F}_{12}(132)] \\ \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}}[\mathbf{F}_1(133) \dots \mathbf{F}_{12}(144)] \\ \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}}[\mathbf{F}_1(145) \dots \mathbf{F}_{12}(156)] \\ \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}}[\mathbf{F}_1(157) \dots \mathbf{F}_{12}(168)] \\ \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}}[\mathbf{F}_1(169) \dots \mathbf{F}_{12}(180)] \end{bmatrix}, \\
\text{SINR}_{\text{UE3}}^{\text{SC-FDMA}} &= \begin{bmatrix} \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}}[\mathbf{F}_1(1) \dots \mathbf{F}_{12}(12)] \\ \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}}[\mathbf{F}_1(13) \dots \mathbf{F}_{12}(24)] \\ \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}}[\mathbf{F}_1(25) \dots \mathbf{F}_{12}(36)] \\ \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}}[\mathbf{F}_1(37) \dots \mathbf{F}_{12}(48)] \\ \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}}[\mathbf{F}_1(49) \dots \mathbf{F}_{12}(60)] \\ \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}}[\mathbf{F}_1(61) \dots \mathbf{F}_{12}(72)] \\ \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}}[\mathbf{F}_1(73) \dots \mathbf{F}_{12}(84)] \\ \text{SINR}^{\text{SC-FDMA}}[\mathbf{F}_1(85) \dots \mathbf{F}_{12}(96)] \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{4.27}$$

Por otra parte, el proceso correspondiente al SINR efectivo es aplicado a cada grupo de subportadoras post-demoduladas, como se define en el sistema de ecuaciones 4.28. Este proceso de SINR efectivo permite obtener la compresión de cada grupo de subportadoras y, por consiguiente, un grupo de valores de SINR para cada usuario.

El sistema de ecuaciones 4.28 presenta una variedad de valores de SINR efectivo para cada usuario. Esto significa que, un usuario puede obtener diferentes índices de CQI, a través de diferentes variantes de asignación del MCS. Por tal motivo, la adaptación de enlace mejorado, ya no depende de un valor único de SINR efectivo, propio del enlace de adaptación clásico (ver sistema de ecuaciones 4.22). EL índice de CQI de cada usuario está definido por el sistema de ecuaciones 4.29.

Posteriormente, se presentan diferentes variantes de la asignación del índice de CQI, que permitirán modificar la cantidad de bits a transmitir en las subportadoras de cada usuario.

$$\begin{aligned}
\text{SINR\_Effec}_{\text{UE1}} &= \left[ \text{SINR\_Effec}[SINR_1^{SC-FDMA}(97) \dots SINR_{12}^{SC-FDMA}(108)] \right], \\
\text{SINR\_Effec}_{\text{UE2}} &= \left[ \begin{array}{l} \text{SINR\_Effec}[SINR_1^{SC-FDMA}(109) \dots SINR_{12}^{SC-FDMA}(120)] \\ \text{SINR\_Effec}[SINR_1^{SC-FDMA}(121) \dots SINR_{12}^{SC-FDMA}(132)] \\ \text{SINR\_Effec}[SINR_1^{SC-FDMA}(133) \dots SINR_{12}^{SC-FDMA}(144)] \\ \text{SINR\_Effec}[SINR_1^{SC-FDMA}(145) \dots SINR_{12}^{SC-FDMA}(156)] \\ \text{SINR\_Effec}[SINR_1^{SC-FDMA}(157) \dots SINR_{12}^{SC-FDMA}(168)] \\ \text{SINR\_Effec}[SINR_1^{SC-FDMA}(169) \dots SINR_{12}^{SC-FDMA}(180)] \end{array} \right], \\
\text{SINR\_Effec}_{\text{UE3}} &= \left[ \begin{array}{l} \text{SINR\_Effec}[SINR_1^{SC-FDMA}(1) \dots SINR_{12}^{SC-FDMA}(12)] \\ \text{SINR\_Effec}[SINR_1^{SC-FDMA}(13) \dots SINR_{12}^{SC-FDMA}(24)] \\ \text{SINR\_Effec}[SINR_1^{SC-FDMA}(25) \dots SINR_{12}^{SC-FDMA}(36)] \\ \text{SINR\_Effec}[SINR_1^{SC-FDMA}(37) \dots SINR_{12}^{SC-FDMA}(48)] \\ \text{SINR\_Effec}[SINR_1^{SC-FDMA}(49) \dots SINR_{12}^{SC-FDMA}(60)] \\ \text{SINR\_Effec}[SINR_1^{SC-FDMA}(61) \dots SINR_{12}^{SC-FDMA}(72)] \\ \text{SINR\_Effec}[SINR_1^{SC-FDMA}(73) \dots SINR_{12}^{SC-FDMA}(84)] \\ \text{SINR\_Effec}[SINR_1^{SC-FDMA}(85) \dots SINR_{12}^{SC-FDMA}(96)] \end{array} \right].
\end{aligned} \tag{4.28}$$

$$\text{Indice\_CQI}_{\text{UE1}} = \left[ \text{SINR\_Effec}_1 \right],$$

$$\text{Indice\_CQI}_{\text{UE2}} = \left[ \begin{array}{l} \text{SINR\_Effec}_1 \\ \text{SINR\_Effec}_2 \\ \text{SINR\_Effec}_3 \\ \text{SINR\_Effec}_4 \\ \text{SINR\_Effec}_5 \\ \text{SINR\_Effec}_6 \end{array} \right],$$

$$\text{Indice\_CQI}_{\text{UE3}} = \left[ \begin{array}{l} \text{SINR\_Effec}_1 \\ \text{SINR\_Effec}_2 \\ \text{SINR\_Effec}_3 \\ \text{SINR\_Effec}_4 \\ \text{SINR\_Effec}_5 \\ \text{SINR\_Effec}_6 \\ \text{SINR\_Effec}_7 \\ \text{SINR\_Effec}_8 \end{array} \right].$$

(4.29)

## 4.8. Variantes de la asignación de MCS mediante CQI

La asignación del índice de CQI permiten determinar el MCS mediante las variantes: 1) valor mínimo del SINR y 2) un valor promedio del SINR. Se espera que, con la asignación del mínimo SINR, se asigne menor cantidad de bits comparado con el valor promedio del SINR. La decisión de utilizar una variante depende del escenario en el cual se asignarán los recursos de radio a los usuarios.

En este trabajo de tesis se abordarán tres variantes de asignación del índice de CQI: 1) asignación del MCS mínimo del SINR (SINR MMCS), definido en la [Ecuación 4.30](#); 2) asignación del MCS promedio del SINR (SINR PMCS), definido en la [Ecuación 4.31](#) y 3) asignación del MCS promedio (PMCS), definido en la [Ecuación 4.32](#).

### Asignación del MCS mínimo del SINR (SINR MMCS)

Para efectos de ejemplificación de las variantes, se toma el vector **Indice\_CQI<sub>UE2</sub>** del sistema de ecuaciones [4.29](#).

La variante SINR MMCS considera el valor mínimo del vector SINR efectivo [\[54\]](#) y [\[56\]](#) del UE3. Por lo tanto, el mapeo llevado a cabo es **SINR efectivo mínimo–CQI**, con:

$$\mathbf{Indice\_CQI}_{UE3} = \mathbf{Minimo}[SINR\_Efec_1, \dots, SINR\_Efec_8]. \quad (4.30)$$

### Asignación del MCS promedio del SINR (SINR PMCS)

La variante SINR PCMS considera el promedio del vector de SINR efectivo del UE3. Por lo tanto, el mapeo es **SINR efectivo promedio–CQI**, con:

$$\mathbf{Indice\_CQI}_{UE3} = \mathbf{Promedio}[SINR\_Efec_1, \dots, SINR\_Efec_8]. \quad (4.31)$$

### Asignación del MCS promedio (PMCS)

La variante PMCS presenta un enfoque diferente. Cada valor del vector de SINR efectivo del UE3 es mapeado a un índice de CQI, por lo tanto, el mapeo es de la siguiente forma:

$SINR\_Efec_1 \rightarrow Indice\_CQI_1, \dots, SINR\_Efec_8 \rightarrow Indice\_CQI_8$ . Después, se obtiene el promedio del vector de índices de CQI y, finalmente, se realiza el mapeo siguiente **Índice de CQI promedio–CQI**, con:

$$UE_3 = [SINR\_Efec_1, \dots, SINR\_Efec_8] = [Indice\_CQI_1, \dots, Indice\_CQI_8] \quad (4.32)$$

$$Indice\_CQI_{UE3} = \text{Promedio}[Indice\_CQI_1, \dots, Indice\_CQI_8]$$

## 4.9. Análisis de la adaptación de enlace mejorado en el simulador LTE

La [Tabla 4.17](#) muestra el SINR efectivo de cada grupo de subportadoras de los usuarios y la [Tabla 4.18](#) muestra el índice de las subportadoras asignadas a los usuarios.

Con la información de las [Tablas 4.17 y 4.18](#), se genera la [Tabla 4.19](#) que muestra el mapeo de los índices con los grupos de las subportadoras asignadas al usuario.

Subpor.	UE1	UE2	UE3
Grupo 1	8.47	5.48	1.59
Grupo 2	10.70	5.46	5.17
Grupo 3	8.97	4.65	6.40
Grupo 4	6.44	6.90	8.34
Grupo 5	10.32	8.73	6.17
Grupo 6	10.18	8.21	8.64
Grupo 7	5.28	9.84	10.42
Grupo 8	10.20	9.51	11.00
Grupo 9	11.64	8.08	11.19
Grupo 10	9.79	12.97	10.62
Grupo 11	8.62	16.06	9.62
Grupo 12	11.25	15.86	6.87
Grupo 13	9.66	15.79	9.27
Grupo 14	-0.11	15.99	8.73
Grupo 15	4.35	13.98	8.14

[Tabla 4.17](#): SINR efectivo de cada grupo de subportadoras para cada UE.

Subpor.	UE	Índices
Grupo 1	UE3	1-12
Grupo 2	UE3	13-24
Grupo 3	UE3	25-36
Grupo 4	UE3	37-48
Grupo 5	UE3	49-60
Grupo 6	UE3	61-72
Grupo 7	UE3	73-84
Grupo 8	UE3	85-96
Grupo 9	UE1	97-108
Grupo 10	UE2	109-120
Grupo 11	UE2	121-132
Grupo 12	UE2	133-144
Grupo 13	UE2	145-156
Grupo 14	UE2	157-168
Grupo 15	UE2	169-180

[Tabla 4.18](#): Índices de los grupos de subportadoras asignadas a cada usuario.

La [Tabla 4.19](#) muestra las asignación del grupo de subportadoras a los usuarios. El UE3 forma un conjunto de 8 grupos de subportadoras (Grupo 1, Grupo 2, Grupo 3, Grupo 4, Grupo 5, Grupo 6, Grupo 7, Grupo 8), el UE1 forma un conjunto de 1 grupo de subportadoras (Grupo 9) y el UE2 forma un conjunto de 6 grupos de subportadoras (Grupo 10, Grupo 11, Grupo 12, Grupo 13, Grupo 14, Grupo 15).

Con el objetivo de mostrar la adaptación de enlace mejorado con la variante SINR MMCS, la [Tabla 4.20](#) muestra el valor mínimo de SINR efectivo de cada usuario marcados con color rojo. Los valores mínimos son: 1) 1.59 dB, para el conjunto del UE3; 2) 11.64 dB, para el conjunto de UE1 y 3) 12.97 dB, para el conjunto del UE2.

Subporta.	UE1	UE2	UE3
Grupo 1	8.47	5.48	1.59
Grupo 2	10.70	5.46	5.17
Grupo 3	8.97	4.65	6.40
Grupo 4	6.44	6.90	8.34
Grupo 5	10.32	8.73	6.17
Grupo 6	10.18	8.21	8.64
Grupo 7	5.28	9.84	10.42
Grupo 8	10.20	9.51	11.00
Grupo 9	11.64	8.08	11.19
Grupo 10	9.79	12.97	10.62
Grupo 11	8.62	16.06	9.62
Grupo 12	11.25	15.86	6.87
Grupo 13	9.66	15.79	9.27
Grupo 14	-0.11	15.99	8.73
Grupo 15	4.35	13.98	8.14

Subporta.	UE1	UE2	UE3
Grupo 1	8.47	5.48	1.59
Grupo 2	10.70	5.46	5.17
Grupo 3	8.97	4.65	6.40
Grupo 4	6.44	6.90	8.34
Grupo 5	10.32	8.73	6.17
Grupo 6	10.18	8.21	8.64
Grupo 7	5.28	9.84	10.42
Grupo 8	10.20	9.51	11.00
Grupo 9	11.64	8.08	11.19
Grupo 10	9.79	12.97	10.62
Grupo 11	8.62	16.06	9.62
Grupo 12	11.25	15.86	6.87
Grupo 13	9.66	15.79	9.27
Grupo 14	-0.11	15.99	8.73
Grupo 15	4.35	13.98	8.14

[Tabla 4.19](#): Mapeo del grupo de subportadoras a los usuarios.

[Tabla 4.20](#): Valor mínimo de SINR efectivo.

## Aplicación de la variante SINR MMCS

La [Tabla 4.21](#) presenta el mapeo **SINR efectivo mínimo–CQI**.

Se asigna el esquema de MCS a los RB de cada usuario, con la finalidad de obtener los bits de datos y la redundancia que deben utilizar los usuarios para transmitir su información.

RBs	UE1	UE2	UE3	MCS
RB1	8.47	5.48	1.59	CQI 5 QPSK bits mod. = 2 CR x 1024 = 449
RB2	10.70	5.46		
RB3	8.97	4.65		
RB4	6.44	6.90		
RB5	10.32	8.73		
RB6	10.18	8.21		
RB7	5.28	9.84		
RB8	10.20	9.51		
RB9	11.64	8.08	11.19	CQI 11 64 QAM bits mod. = 6 CR x 1024 = 567
RB10	9.79	12.97	10.62	CQI 11 64 QAM bits mod. = 6 CR x 1024 = 567
RB11	8.62		9.62	
RB12	11.25		6.87	
RB13	9.66		9.27	
RB14	-0.11		8.73	
RB15	4.35		8.14	

[Tabla 4.21](#): Mapeo del CQI-SINR para obtener el MCS de cada usuario.

Finalmente, la [Tabla 4.22](#) presenta los bits de datos y redundancia obtenido por cada de usuario, de acuerdo a los RB asignados, la adaptación de enlace mejorado y la variante de SINR MMCS.

Usuario	Bits de datos	Redundancia	RBs asignados	MCS
UE1	416	376	1	CQI 11 64 QAM bits mod. = 6 CR x 1024 = 567
UE2	2608	2144	6	CQI 11 64 QAM bits mod. = 6 CR x 1024 = 567
UE3	904	1208	8	CQI 5 QPSK bits mod. = 2 CR x 1024 = 449

Tabla 4.22: Bits de datos asignados a los usuarios con SNR efectivo mínimo.

En este Capítulo se analizaron los siguientes aspectos:

En la [subsección 4.5.2](#) se demostró la asignación de recursos de RB de forma localizada a los usuarios mediante la búsqueda del par UE-RB con el valor más alto de SINR. En las [Tablas 4.4, 4.5, y 4.6](#) se analizó la asignación de recursos para tres usuarios y un ancho de banda de 3 MHz (15 RBs) mediante el algoritmo RME.

Por otra parte, se analizó el aspecto teórico y práctico del algoritmo de adaptación de enlace clásico que obtiene un valor único de SINR efectivo de todas las subportadoras asignadas a un usuario, lo que conduce a una carencia de asignar diferentes configuraciones del MCS y, por consiguiente, una mala adaptación del canal que contribuye a la pérdida significativa de los recursos de radio. Por esta razón, se implementa una mejora de la adaptación de enlace que permite obtener una variedad de valores de SINR efectivo de los RB asignados a los usuarios, lo que conlleva a considerar la asignación de diferentes configuraciones del MCS a un usuario.



En la [sección 4.6](#) se analizó el aspecto teórico de la adaptación de enlace clásico mediante las subportadoras ya asignadas a tres usuarios por el algoritmo RME. Los sistemas de ecuaciones que modelan la adaptación de enlace clásico son definidas en, [4.15](#), [4.16](#), [4.17](#), [4.18](#), [4.19](#), [4.20](#), [4.21](#), [4.22](#) y [4.23](#). La [Ecuación 4.23](#) demuestra que las subportadoras asignadas a un usuario obtienen un valor único de SINR efectivo.

En la [subsección 4.6.1](#), se demostró el funcionamiento de la adaptación de enlace clásico y la asignación del índice de CQI a un valor único de SINR efectivo a través del simulador de LTE. Los resultados de la evaluación son presentados en las [Tablas 4.9](#), [4.10](#), [4.11](#), [4.12](#), [4.13](#), [4.14](#), [4.15](#) y [4.16](#). Además, las [Tablas 4.10](#), [4.11](#) y [4.12](#) muestran la asignación del índice de CQI a un valor único de SINR efectivo.

En la [sección 4.7](#), se analizó el aspecto teórico de la adaptación de enlace mejorado mediante el sistema de ecuaciones definidos en, [4.24](#), [4.25](#), [4.26](#), [4.27](#), [4.28](#) y [4.29](#). La [Ecuación 4.29](#) demuestra que las subportadoras asignadas a un usuario obtiene varios valores de SINR efectivo.

En la [subsección 4.9](#), se demostró el funcionamiento de la adaptación de enlace mejorado a través del simulador de LTE. Los resultados son presentados en las [Tablas 4.17](#), [4.18](#) y [4.19](#).

También, se analizó la variante de la asignación de MCS mediante la asignación del índice de CQI al usuario. Esto con la finalidad de acotar la asignación de la tasa bits al usuario y, así evitar, una pérdida considerable de recursos de radio en un entorno con canales altamente variables en el tiempo.

En la [sección 4.8](#), se propuso dos tipos de variantes de asignación del índice de CQI, el SINR PMCS y el PMCS y, además, se describe la variante MMCS propuesta en la literatura especializada. Las [Ecuaciones 4.30](#), [4.31](#) y [4.32](#) muestran las variantes MMCS, SINR PMCS y PMCS, respectivamente.

En las [Tablas 4.21](#) y [4.22](#), se demostró la aplicación de la asignación del índice de CQI mediante la variante MMCS.

# Capítulo 5

## Evaluación de desempeño de los algoritmos de la asignación de recursos en LTE

### 5.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de las evaluaciones de desempeño que permiten validar los algoritmos propuestos en el Capítulo 4. Se ha optado por realizar un conjunto de pruebas bajo un escenario que presenta fluctuaciones rápidas y dos distintas velocidades, tales como 80 km/h y 350 km/h. Estas velocidades son comunes en carretera y en trenes de alta velocidad. Además, se utiliza un modelo de canal vehicular extendido de 9 taps (componentes de multitrayectoria del canal), con fluctuaciones rápidas para emular un canal vehículo-infraestructura. El enlace de subida, bajo estudio, se conforma por un usuario móvil, como un transmisor, y la estación base como un receptor. De acuerdo a la literatura revisada, un canal vehículo-infraestructura experimenta un valor promedio de SNR de 6 dB [74]. Con base en esta información, las simulaciones son llevadas a cabo para un valor de SNR de 6 dB. Para validar, sustentar y verificar la hipótesis planteada al inicio de este trabajo de tesis, los algoritmos propuestos se evalúan a través de diferentes métricas de evaluación, tales como la asignación de recursos, rendimiento (*throughput*), justicia (*fairness*), tasa de error del bloque (BLER, por sus siglas en inglés), bajo diferentes número de usuarios y valores de SNR.

Todas las evaluaciones han sido realizadas simulando velocidades de 80 kmh y 350 kmh, de forma independiente y en una comparación conjunta de ambas velocidades.

Resumiendo, este capítulo aborda validación del diseño del algoritmo de asignación de recursos, análisis teórico de la adaptación de enlace clásico y mejorado.

También, se aborda la validación de las variantes de la asignación del esquema de modulación y codificación (MCS, por sus siglas en inglés) mediante el índice del indicador de calidad de canal (CQI, por sus siglas en inglés) y la verificación de funcionamiento de la adaptación de enlace clásico y mejorado, en conjunto con las variantes del MCS, a través del simulador de la tecnología evolución a largo plazo (LTE, por sus siglas en inglés) Vienna v1.5.

## 5.2. Evaluación de desempeño a 80 km/h

La evaluación de los algoritmos propuestos en este trabajo de tesis son: la adaptación de enlace mejorado (AEM), en conjunto con el algoritmo de asignación de recursos de radio RME, bajo dos diferentes variantes (propuestas) de asignación del índice de CQI, tales como la asignación del MCS promedio del SINR (SINR PMCS) y la asignación del MCS promedio (PMCS). Los algoritmos base (de la literatura), empleados como referencia, son: 1) el esquema MCS de Vienna, bajo el enlace de adaptación clásico (AEC) [33] con el algoritmo RME, y 2) la variante MMCS propuesta en [54], [56], con la AEM y el algoritmo RME.

### 5.2.1. Parámetros de simulación

Los algoritmos de AEM, las variantes de MCS y el algoritmo RME fueron implementados en el simulador de LTE de Vienna para el enlace de subida a nivel de enlace v1.5. Con el objetivo de obtener simulaciones a nivel de portadora, el simulador fue configurado con diferentes parámetros a nivel de la capa física de LTE.

El modelo de canal es un canal vehicular extendido del tipo A con 9 taps [73]. Además, la duplexación por división de frecuencia (FDD, por sus siglas en inglés) fue utilizada como estructura principal de LTE. Cada traza de simulación fue promediada a través de 1000 *subframes*, o 1000 intervalos de tiempo de transmisión (TTI, por sus siglas en inglés). La técnica de estimación del canal y el tipo de mutitrayectoria utilizados en el eNB son el mínimo error cuadrático medio (MMSE, por sus siglas en inglés) y fluctuaciones rápidas,

respectivamente. Las velocidades de 80 km/h y 350 km/h fueron utilizadas en la evaluación de los algoritmos.

La frecuencia de transmisión de 1700 MHz fue utilizada para el enlace de subida. Además, el simulador fue configurado con un ancho de banda de 10 MHz, correspondiente a 50 RB, para repartir entre los usuarios dentro de la celda de LTE.

Con base en los artículos [74], [75], un canal inalámbrico con mala calidad de canal, en un escenario vehículo-infraestructura (V2I), experimenta un valor promedio de SNR equivalente a 6 dB.

Los parámetros empleados en la simulación, son mostrados en la [Tabla 5.1](#).

Parámetros	Valor
Ancho de banda	10 MHz
Número de usuarios	10, 20, 30, 40, 50
Valor de SNR	6 dB
Número de subframes (TTI)	1000
Modelo de canal	Eveh A de 9 taps
Filtrado	<i>Fast fading</i>
Tráfico	<i>Full buffer</i>
Estimación de canal	MMSE
Frecuencia de transmisión	1700 MHz
Velocidad	80 km/h

[Tabla 5.1](#): Parámetros de simulación.

### 5.2.2. Métricas de evaluación

- La métrica de **asignación de recursos** es la tasa de bits asignada a los usuarios derivada de los bloques de recursos (RB, por sus siglas en inglés), la adaptación de enlace y la asignación de bits (resultado de la asignación del índice de CQI), el cual se define de la siguiente forma:

$$AR = \frac{B_{asignados}}{t_{sim}}, \quad (5.1)$$

donde  $B_{asignados}$  es el número de bits total asignados por el eNB al UE y  $t_{sim}$  es el tiempo de simulación.

- La métrica de **rendimiento** (*throughput*) es la tasa de bits de datos recibidos de forma exitosa en el receptor bajo una cantidad de tiempo determinado, el cual se encuentra definido como sigue:

$$\bar{T}_{celda} = \frac{B}{t_{sim}}, \quad (5.2)$$

donde B es el número de bits total recibidos exitosamente sobre la interface de aire del UE al eNB.

- La métrica de **justicia** (*fairness*) determina el porcentaje de usuarios atendidos en la celda de LTE, el cual está definido de la siguiente forma:

$$J = \frac{|\sum_{i=1}^{N_{UE}} x_i|^2}{N_{UE} \sum_{i=1}^{N_{UE}} x_i^2}, \quad (5.3)$$

donde  $x_i$  es el rendimiento promedio normalizado del  $i$ -usuario.

- La métrica de **BLER** es el cociente entre los bloques erróneos y el total de los bloques recibidos exitosamente, el cual se encuentra definido de la siguiente forma:

$$BLER = \frac{B_{error}}{B}, \quad (5.4)$$

donde  $B_{error}$  el número de bits recibidos con error.

El bloque de transporte (TB, por sus siglas en inglés) es recibido de forma exitosa, si la verificación de redundancia cíclica (CRC, por sus siglas en inglés) se detecta sin errores en el receptor. En caso contrario, el receptor transmite un mensaje para solicitar la retransmisión de paquetes.

- La métrica de **eficiencia espectral** es el número de bits transportados en un segundo respecto de un ancho de banda dado, el cual está definido de la siguiente forma:

$$ES = \frac{B}{BW}. \quad (5.5)$$

donde BW es el ancho de banda total de los RB (180 kHz) que transporta una cantidad específica de bits.

### 5.2.3. Definición de los algoritmos a evaluar

Los algoritmos a evaluar, se describen a continuación:

- Algoritmo de asignación de recursos, RME.
- Adaptación de enlace, AEM y AEC.
- Variantes de la asignación del esquema de modulación y codificación (MCS, por sus siglas en inglés), Vienna MCS, MMCS, SINR PMCS y PMCS, correspondiente a las Ecuaciones 4.23, 4.30, 4.31 y 4.32, respectivamente.

Las siguientes combinaciones evaluadas son:

- RME, PMCS (propuesto) y AEM (propuesto).
- RME, SINR PMCS (propuesto) y AEM (propuesto).
- RME, Vienna MCS y AEC.
- RME, MMCS y AEM (propuesto).

Todas las evaluaciones fueron realizadas en combinación con el algoritmo RME. Para una mayor comprensión en la comparación de los algoritmos, se omite la palabra RME de la leyenda de las gráficas resultantes. Por lo tanto, se tiene lo siguiente:

- PMCS propuesto con AEM.
- SINR PCMS propuesto con AEM.
- Vienna MCS con AEC.
- MMCS con AEM.

### 5.2.4. Resultados del desempeño obtenidos

La Figura 5.1 muestra la asignación de recursos respecto de el número de usuarios. El SINR PMCS AEM propuesto presenta una alta tasa de bits asignada por el eNB. Sin embargo, la asignación de recursos mediante el algoritmo SINR PMCS AEM, no es óptimo en entornos donde las subportadoras de los usuarios experimentan bajo SNR. Por otra parte, es importante mencionar que este mismo algoritmo puede incrementar el rendimiento en escenarios donde los usuarios experimenten una buena calidad de canal.

Cuando hay 50 usuarios en la celda de LTE, el algoritmo SINR PMCS AEM propuesto presenta una considerable mejora en la asignación de tasa de bits, comparado con los algoritmos PMCS AEM, MMCS y Vienna MCS AEC, en un 34 %, 30 % y 26 %, respectivamente. Esto es debido a que el algoritmo propuesto considera el promedio de SINR efectivo derivado de la AEM. Sin embargo, esto no significa una mejora en el rendimiento (*throughput*) a nivel de enlace, específicamente, en escenarios donde existen cambios abruptos, ocasionados por la velocidad y fluctuaciones rápidas de las señales recibidas en el dominio del tiempo.

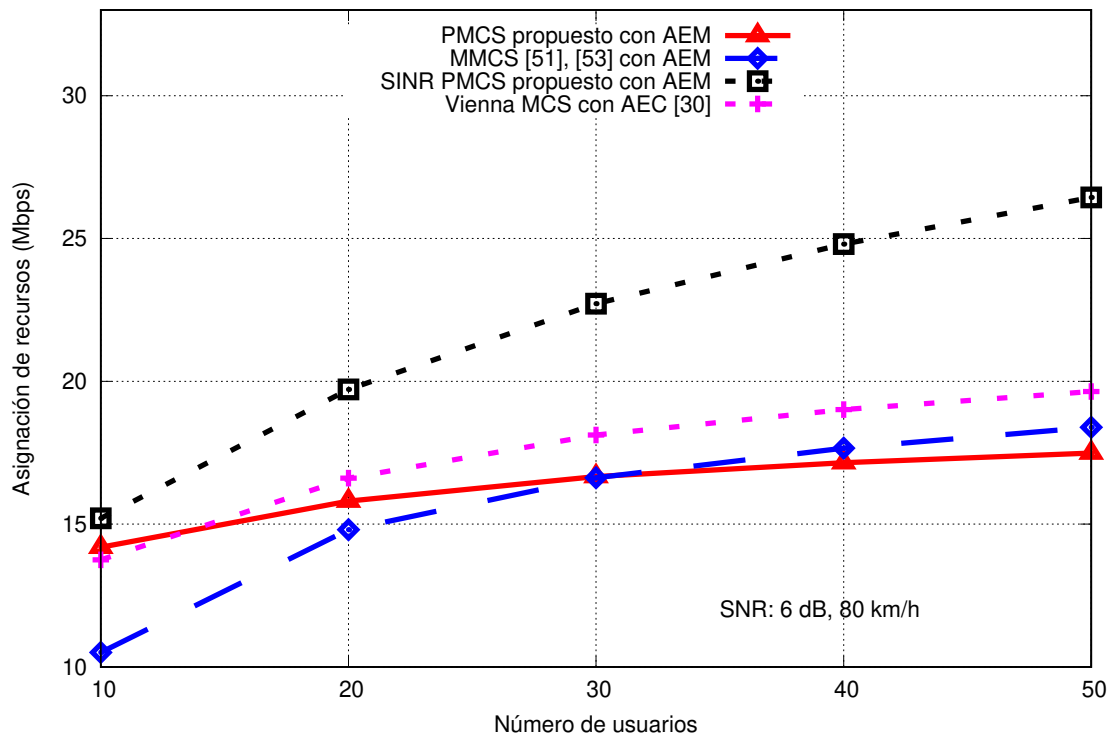


Figura 5.1: Asignación de recursos a los usuarios con una velocidad de 80 km/h.

De acuerdo a la [Figura 5.1](#), cuando hay 50 usuarios en la celda de LTE, el algoritmo PMCS AEM propuesto presenta la menor cantidad de tasa bits asignada a los usuarios en un 4 % comparado con el MMCS AEM. Esto es debido a que el promedio es directamente aplicado a los índices de CQI (resultado del mapeo SINR-CQI), en lugar de utilizar directamente los valores de SINR efectivo (métrica que utiliza el SINR PMCS AEM).

La [Tabla 5.2](#) muestra los resultados de la comparación entre el SINR PMCS AEM y los algoritmos PMCS AEM, MMCS AEM y Vienna MCS AEC, en términos de porcentaje de la asignación de la tasa de bits. Los resultados presentan una mejora considerable en la asignación de la tasa de bits del SINR PMCS AEM.

Usuarios	10	20	30	40	50
<b>SINR PMCS AEM comparado con Vienna MCS AEC</b>	10 %	16 %	20 %	23 %	26 %
<b>SINR PMCS AEM comparado con MMCS AEM</b>	30 %	25 %	27 %	29 %	30 %
<b>SINR PMCS AEM comparado con PMCS AEM</b>	7 %	20 %	27 %	31 %	34 %

[Tabla 5.2](#): Comparación de los resultados de la asignación de recursos con una velocidad de 80 km/h.

Es importante hacer énfasis que los usuarios que transmiten y reciben información en un canal inalámbrico variante en el tiempo, derivado de las altas velocidades y rápidos desvanecimientos, dan origen a escenarios con valores bajos de SNR, además de conducir a un desperdicio considerablemente alto de recursos de radio. Bajo esta premisa, es crucial el análisis del rendimiento (*throughput*) del sistema, justicia (*fairness*) y el BLER de los algoritmos analizados en un entorno de valores bajos de SNR, tales como escenarios vehículo-infraestructura.

La correcta asignación de la tasa de bits a los usuarios es crucial en entornos con valores bajos de SNR. Por lo tanto, si el algoritmo asigna una cantidad alta de tasa de bits a un usuario que experimenta mala calidad de canal, existe una alta probabilidad de perder los recursos en la interface de aire de LTE. Por esta razón, en este capítulo se examina de manera más profunda los algoritmos que asignan la menor tasa de bits a los usuarios, tales como el PMCS AEM propuesto y el MMCS AEM.



La Figura 5.2 muestra el rendimiento respecto de el número de usuarios con una velocidad de 80 km/h con un SNR de 6 dB. Los resultados de la Figura 5.2 muestran que para 50 usuarios, el algoritmo PMCS AEM propuesto y el algoritmo de referencia MMCS AEM presentan una mejora del 15 % y 13 % comparado con el Vienna MCS AEC, respectivamente.

Es importante remarcar que los usuarios que utilizan los algoritmos PMCS AEM propuesto y el MMCS AEM obtienen el mejor rendimiento, comparado con los usuarios que utilizan los algoritmos SINR PMCS y Vienna MCS AEC. Lo anterior, a pesar de que el eNB asignó la menor tasa de bits a los usuarios que utilizan los algoritmos PMCS AEM propuesto y MMCS AEM. Por otra parte, el algoritmo SINR PMCS AEM presenta una considerable pérdida del rendimiento conforme el número de usuarios se incrementa. Este comportamiento es una consecuencia del elevado número de bits de datos asignados a los usuarios en entornos con mala calidad de canal.

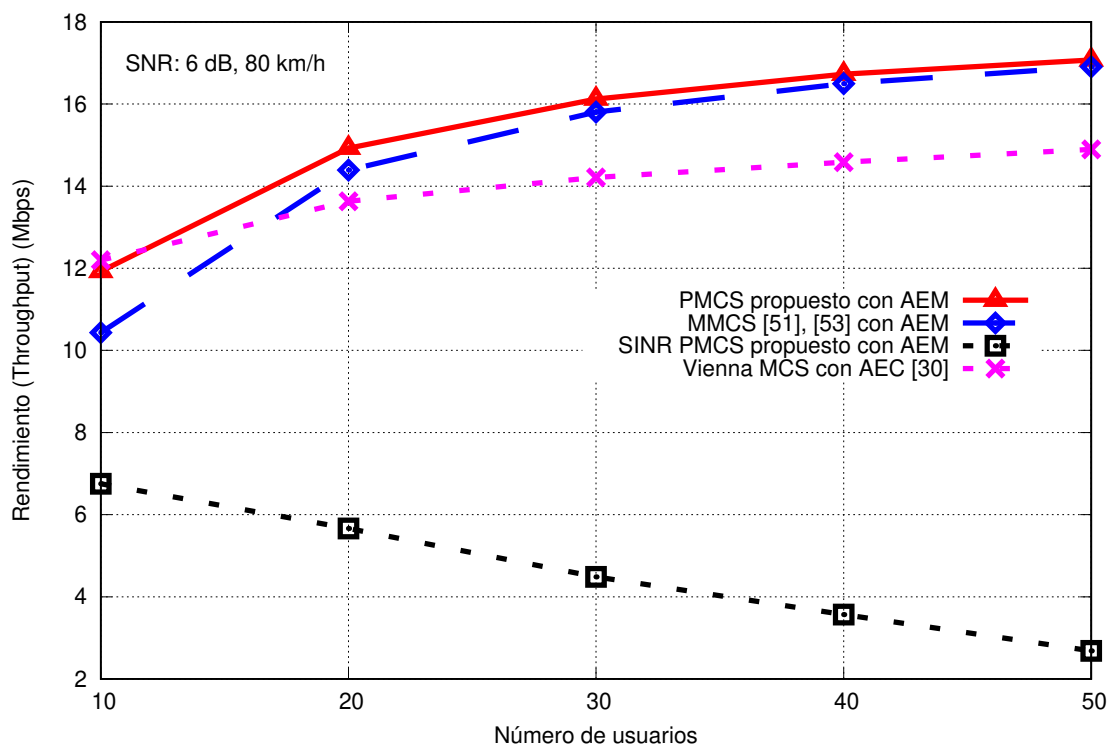


Figura 5.2: Rendimiento (*Throughput*) con un SNR de 6 dB con una velocidad de 80 km/h.

Los resultados de la Figura 5.2 muestran que, asignar mayor tasa de bits a un usuario que experimenta mala calidad de canal tiende a desperdiciar los recursos de radio y, por consiguiente, existe una degradación del rendimiento.

En caso contrario, si la asignación de la tasa de bits a los usuarios no es alta, existe una mayor probabilidad de obtener un mejor rendimiento.

La [Tabla 5.3](#) muestra la comparación entre el algoritmo PMCS AEM propuesto y los algoritmos de referencia MMCS AEM, Vienna MCS AEC y el algoritmo SINR PMCS AEM propuesto, en términos de porcentaje. Cuando existen 50 usuarios en la celda de LTE, el algoritmo PMCS AEM propuesto presenta una mejora en rendimiento del 13 % y 1 %, comparado con los algoritmos Vienna MCS AEC y MMCS AEM, respectivamente. De acuerdo a los resultados obtenidos, la comparación entre los algoritmos PMCS AEM propuesto y Vienna MCS AEC, el algoritmo PMCS AEM presenta un rendimiento superior del 10 %. Esto significa una mejora significativa, en términos de rendimiento en escenarios con valores bajos de SNR para el enlace de subida de LTE.

Usuarios	10	20	30	40	50
<b>PMCS AEM comparado con MMCS AEM</b>	13 %	4 %	2 %	1 %	1 %
<b>PMCS AEM comparado con Vienna MCS AEC</b>	-2 %	9 %	12 %	13 %	13 %
<b>PMCS AEM comparado con SINR PMCS AEM</b>	43 %	62 %	72 %	79 %	84 %

[Tabla 5.3](#): Comparación de los resultados del rendimiento con una velocidad de 80 km/h.

La implementación conjunta de la variante PMCS, la AEM y el algoritmo RME permiten una mejora significativa del 10 % del rendimiento del enlace de subida de LTE.

La [Figura 5.3](#) muestra la justicia (*fairnes*) respecto de el número de usuarios. En el caso de 50 usuarios, el algoritmo PMCS AEM propuesto presenta una mejora de la justicia del 7 %, 63 % y 20 %, comparado con los algoritmos MMCS AEM, SINR PMCS AEM y Vienna MCS AEC, respectivamente. De acuerdo a los resultados obtenidos, el algoritmo PMCS AEM propuesto tiene una mejor equidad en la asignación de recursos de radio y la tasa de bits a los usuarios, mientras que el algoritmo Vienna MCS AEC presenta una degradación considerable en la equidad de la repartición de recursos de radio a los usuarios.

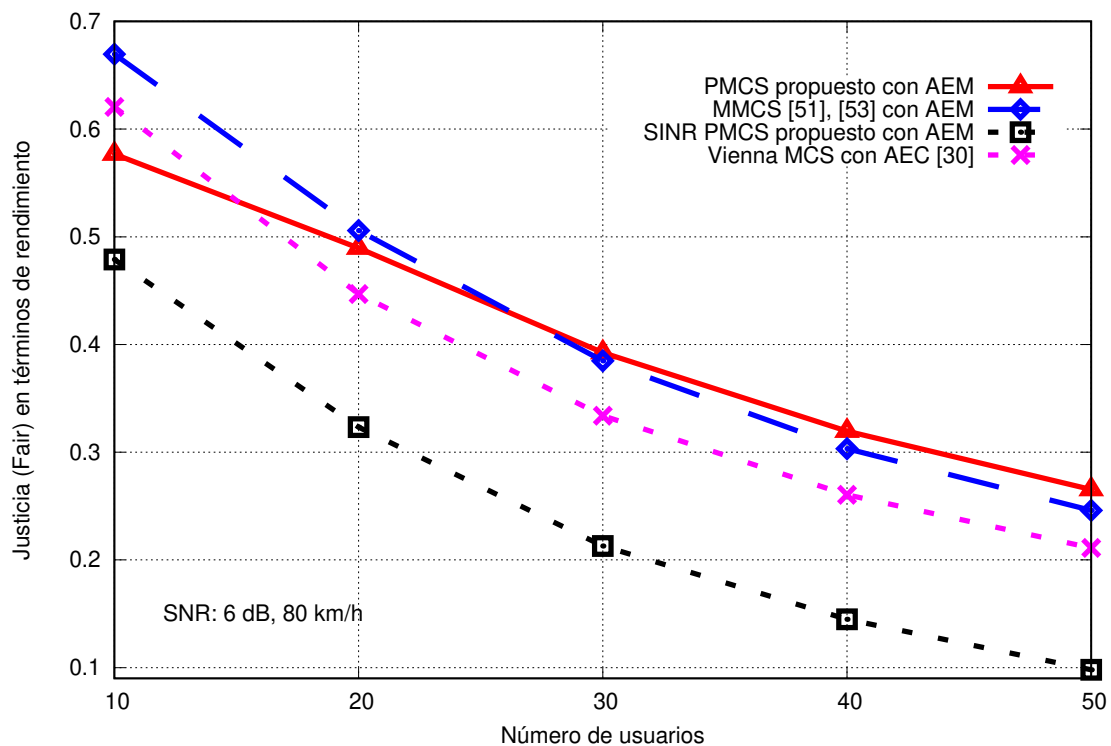


Figura 5.3: Justicia (*Fairness*) bajo un SNR de 6 dB con una velocidad de 80 km/h.

La Tabla 5.4 presenta un resumen de los valores de justicia de los algoritmos evaluados. En el caso de 10 usuarios los algoritmos PMCS AEM, MMCS AEM, SINR PMCS y Vienna MCS AEC asignan recursos en un 60 %, 70 %, 50 % y 60 % de los usuarios que solicitaron recursos, respectivamente. En el caso de 50 usuarios los algoritmos PMCS AEM, MMCS AEM, SINR PMCS y Vienna MCS AEC asignan recursos en un 30 %, 20 %, 10 % y 20 % de los usuarios que solicitaron recursos, respectivamente.

Los resultados muestran que el algoritmo PMCS AEM propuesto presenta mejor equidad conforme se incrementa el número de usuarios en el celda.

La Figura 5.4 muestra la tasa de error de bloque (BLER), respecto de el número de usuarios en un entorno que tiene un SNR de 6 dB y una velocidad de 80 km/h. En un intervalo de 30 a 50 usuarios, el algoritmo PMCS AEM propuesto presenta un decremento de la tasa de error de bloque comparado con los algoritmos de referencia MMCS AEM, Vienna MCS AEC y el algoritmo SINR PMCS AEM propuesto. Además, el algoritmo PMCS AEM propuesto se va adaptando a las condiciones del canal, mediante el decremento considerable del BLER, mientras que los algoritmos restantes presentan un incremento del BLER.

Usuarios	PMCS con AEM	MMCS con AEM	SINR PMCS con AEM	Vienna MCS con AEC
10	0.6	0.7	0.5	0.6
20	0.5	0.5	0.3	0.4
30	0.4	0.4	0.2	0.3
40	0.3	0.3	0.1	0.3
50	0.3	0.2	0.1	0.2

Tabla 5.4: Comparación de los resultados de la justicia con una velocidad de 80 km/h.

Otro aspecto relevante es el intervalo de 10 a 30 usuarios donde el BLER es menor para el Vienna MCS AEC y el MMCS AEM, comparados con el algoritmo PMCS AEM propuesto. Con base en los resultados observados de la Figura 5.4, podemos inferir que, cuando existe un número reducido de usuarios (10-29) en la celda de LTE, el algoritmo MMCS AEM tiene una menor pérdida de recursos, mientras que, con un número mayor de usuarios (30-50), el algoritmo PMCS AEM propuesto presenta menor pérdida recursos.

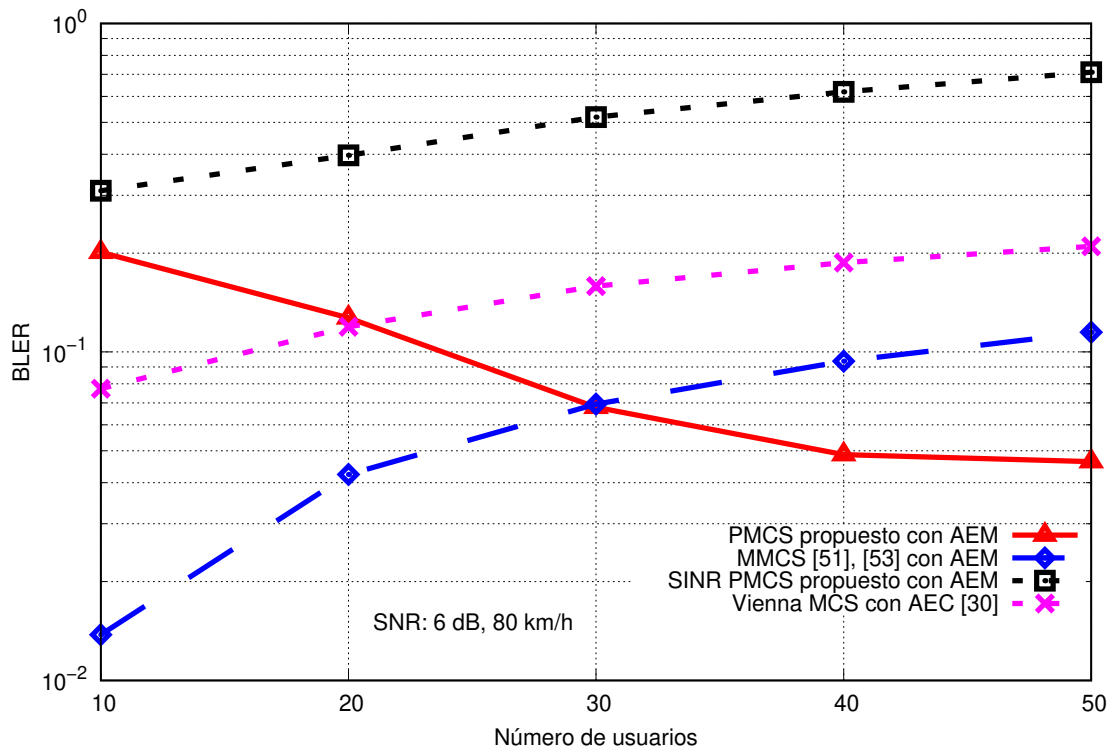


Figura 5.4: BLER bajo un SNR de 6 dB con una velocidad de 80 km/h.

El algoritmo SINR PMCS AEM propuesto presenta una tasa del BLER alta, lo que significa que la pérdida de recursos es significativa debido a las fluctuaciones rápidas del canal inalámbrico. Cabe mencionar, que los usuarios que utilizan el algoritmo SINR PMCS AEM propuesto recibieron una cantidad alta de tasa de bits comparado con los otros algoritmos. De acuerdo con los resultados, se confirma que un usuario con una asignación significativa de la tasa de bits, en un escenario con un SNR de 6 dB y una velocidad de 80 km/h, tiene una mayor probabilidad de perder los recursos de radio durante la transmisión de sus datos.

La [Tabla 5.5](#) muestra un resumen con los valores de la tasa de error del bloque, en términos de porcentaje. Estos valores representan los bloques de transporte perdidos durante la transmisión de información de los usuarios. La mínima tasa de error permitida en un sistema LTE corresponde a un BLER del 10%, lo que significa que el receptor recibe al menos un 90% de los bloques transmitidos, es decir, el 90% de transmisión exitosa.

A partir de los valores de la [Tabla 5.5](#), el porcentaje de transmisión exitosa calculado para cada algoritmo se muestra en la [Tabla 5.6](#).

Cuando existen 30, 40 y 50 usuarios en el celda de LTE, el algoritmo PMCS AEM propuesto presenta un BLER del 7%, 5% y 5%, que corresponde a un tasa de transmisión exitosa del 93%, 95% y 95%, respectivamente. Con estos resultados se verifica que el algoritmo PMCS AEM propuesto de 30 a 50 usuarios está dentro de la tasa mínima del error permitido.

<b>Usuarios</b>	<b>PMCS con AEM</b>	<b>MMCS con AEM</b>	<b>SINR PMCS con AEM</b>	<b>Vienna MCS con AEC</b>
10	20 %	1 %	31 %	8 %
20	13 %	4 %	40 %	12 %
30	7 %	7 %	52 %	16 %
40	5 %	9 %	62 %	19 %
50	5 %	11 %	71 %	21 %

[Tabla 5.5](#): Comparación de los resultados del BLER con una velocidad de 80 km/h.

Para el caso del algoritmo MMCS AEM con 10, 20, 30 y 40 usuarios, el BLER es del 1%, 4%, 7% y 9%, con una transmisión exitosa del 99%, 96%, 93% y 91%, respectivamente.

El algoritmo SINR PMCS AEM propuesto presenta una pérdida muy alta de recursos, mientras que el algoritmo Vienna MCS AEC solamente trabaja de forma adecuada con 10 usuarios mediante un BLER del 8 % a una tasa de transmisión exitosa del 92 %.

Usuarios	PMCS con AEM	MMCS con AEM	SINR PMCS con AEM	Vienna MCS con AEC
10	80 %	99 %	69 %	92 %
20	87 %	96 %	60 %	88 %
30	93 %	93 %	48 %	84 %
40	95 %	91 %	38 %	81 %
50	95 %	89 %	29 %	79 %

**Tabla 5.6:** Comparación de los resultados de la tasa de transmisión exitosa con una velocidad de 80 km/h.

Los resultados derivados de las simulaciones muestran que el algoritmo PMCS AEM propuesto y el algoritmo de referencia MMCS AEM tienen una tasa de transmisión de éxito mayor al 90 %. Sin embargo, el algoritmo PMCS AEM propuesto presenta un incremento de la tasa de transmisión de éxito conforme se incrementa el número de usuarios, mientras que en las mismas condiciones el algoritmo MMCS con AEM muestra un decremento de la tasa de transmisión de éxito (ver [Tabla 5.6](#)).

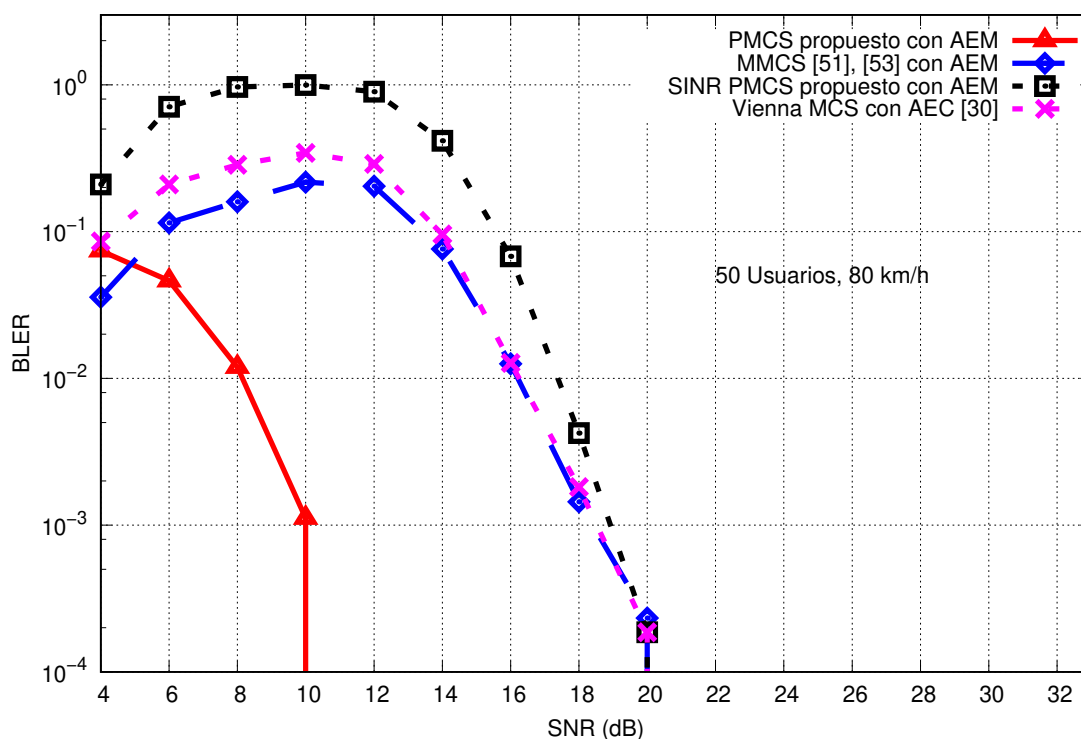
Con 50 usuarios, el algoritmo PMCS AEM propuesto muestra una mejora de la tasa de transmisión exitosa de hasta un 60 %, comparado con el algoritmo de referencia MMCS AEM. Esto es debido a la variante de la asignación del índice de CQI propuesto. La pérdida significativa de recursos en los algoritmos MMCS AEM, SINR PMCS AEM propuesto y Vienna MCS AEC es el resultado de una asignación inadecuada del valor de CQI a los usuarios en la celda. Este comportamiento es atribuido a las variantes del MCS, que permite a los algoritmos asignar más bits de datos a los usuarios, mediante el promedio del SINR efectivo o SINR mínimo efectivo, en un canal inalámbrico muy variante en el tiempo.

El algoritmo PMCS AEM propuesto asigna un índice de CQI a cada valor de SINR efectivo. Después, la variante de MCS calcula el valor de promedio de los índices de CQI para limitar la asignación de tasa de bits. Aunado a esto, la AEM, junto con el algoritmo de asignación de recursos RME, conducen a la utilización de recursos de forma más eficiente.

Esto permite evitar una pérdida significativa de recursos de radio en un canal variante en el tiempo.

Con el objetivo de corroborar que el algoritmo PMCS AEM propuesto mejora el BLER, la [Figura 5.5](#) muestra el BLER, respecto de la SNR, para 50 usuarios en la celda de LTE. El análisis está enfocado solamente en un intervalo del SNR de 4 a 10 dB, debido a que el canal inalámbrico de un entorno vehículo-infraestructura tiene un valor promedio de SNR de 6 dB [74], [75].

De acuerdo a la [Figura 5.5](#), el algoritmo PMCS AEM propuesto muestra una mejora del BLER comparado con el algoritmo de referencia MMCS AEM en un 7 %, 15 % y 22 %, para valores de SNR de 6, 8 y 10 dB, respectivamente. Para el caso de los algoritmos de referencia MMCS AEM y el Vienna MCS AEC, el BLER del 10 % solo está presente cuando el valor de SNR es 4 dB, mientras que los otros valores del SNR analizados (4-10 dB) no cumplen con el BLER del 10 %. El algoritmo SINR PMCS AEM propuesto muestra una pérdida de recursos de radio en un intervalo de 4 a 10 dB.



[Figura 5.5](#): BLER con 50 usuarios a diferentes valores de SNR con un velocidad de 80 km/h.

Las [Tablas 5.7 y 5.8](#) muestran el BLER y la tasa de transmisión exitosa, respectivamente. Para valores de SNR de 4, 6, 8 y 10 dB, el algoritmo PMCS AEM propuesto presenta una tasa de error del bloque del 7 %, 5 %, 1 % y 0.1 %, con una tasa de transmisión exitosa del 93 %, 95 %, 99 % y 99.9 %, respectivamente. Esto significa que, en valores de 4, 6, 8 y 10 dB de la SNR, el algoritmo PMCS AEM propuesto cumple con un BLER menor al 10 %. Para un valor de SNR de 4 dB, los algoritmos de referencia MMCS AEM y Vienna MCS AEC muestran una tasa de error del bloque del 4 % y 9 %, con una tasa de transmisión exitosa del 96 % y 91 %, respectivamente.

SNR [dB]	PMCS con AEM	MMCS con AEM	SINR PMCS con AEM	Vienna MCS con AEC
4	7 %	4 %	21 %	9 %
6	5 %	11 %	71 %	21 %
8	1 %	16 %	97 %	29 %
10	0.1 %	22 %	100 %	34 %

[Tabla 5.7:](#) Comparación de los resultados del BLER con una velocidad de 80 km/h a diferentes valores de SNR de 4, 6, 8 y 10 dB.

SNR [dB]	PMCS con AEM	MMCS con AEM	SINR PMCS con AEM	Vienna MCS con AEC
4	93 %	96 %	79 %	91 %
6	95 %	89 %	29 %	79 %
8	99 %	84 %	3 %	71 %
10	99.9 %	78 %	0.1 %	66 %

[Tabla 5.8:](#) Comparación de los resultados de la tasa de transmisión exitosa con una velocidad de 80 km/h a diferentes valores de SNR de 4, 6, 8 y 10 dB.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el algoritmo PMCS AEM propuesto presenta una mejora significativa en el uso eficiente de los recursos de radio mediante la reducción del BLER. Esto significa que el desperdicio de recursos de radio ha sido mejorado en un intervalo de SNR de 4 a 10 dB. Además, se confirma que el algoritmo PMCS AEM propuesto conduce a un mejor desempeño en escenarios vehículo-infraestructura.



La Figura 5.6 muestra la eficiencia espectral respecto de el número de usuarios. En el intervalo de 20 a 50 usuarios, el algoritmo PMCS AEM propuesto y el algoritmo MMCS AEM de referencia presentan una menor eficiencia espectral comparado con el algoritmo SINR PMCS AEM propuesto y el algoritmo de referencia Vienna MCS AEC. El algoritmo SINR PMCS AEM propuesto muestra una mayor cantidad de bits por segundo en cada Hertz y, por consiguiente, es el algoritmo que presenta un mejor desempeño en términos de eficiencia espectral. Sin embargo, en entornos con valores bajos de SNR, el algoritmo SINR PMCS AEM propuesto no es factible debido a que conduce a un desperdicio significativo de recursos de radio.

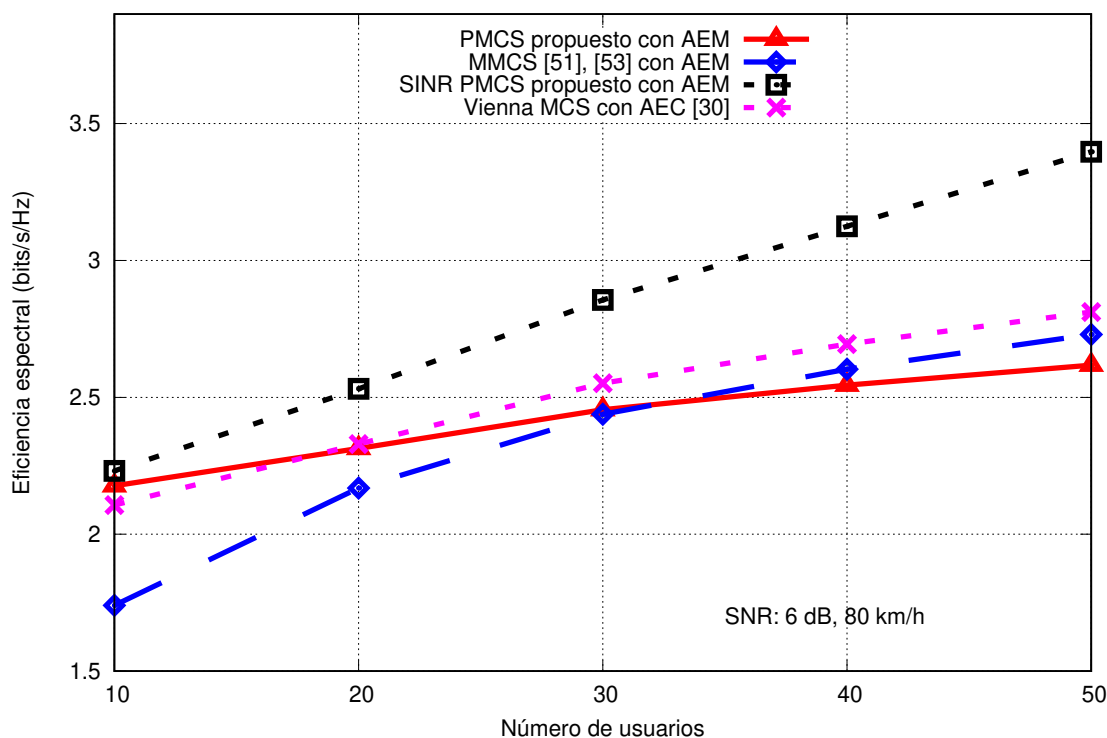


Figura 5.6: Eficiencia espectral con velocidad de 80 km/h.

Con el análisis de las métricas de eficiencia espectral y la asignación de recursos se confirma que el algoritmo SINR PMCS AEM propuesto obtiene una mayor tasa de bits comparado con el algoritmo PMCS AEM propuesto y los algoritmos de referencia, MMCS AEM y Vienna MCS AEC. Bajo este enfoque, el algoritmo SINR PMCS AEM propuesto puede mejorar el rendimiento en escenarios donde los usuarios no experimenten una degradación de la señal debido a la alta variabilidad en el tiempo del canal inalámbrico.

### 5.3. Evaluación de desempeño a 350 km/h

En esta sección, la evaluación de los algoritmos presentados en este trabajo de tesis son analizados bajo una velocidad de 350 km/h. Estas velocidades son comunes en trenes de alta velocidad que están bajo la cobertura del sistema LTE. La variabilidad del canal inalámbrico es mucho más alta a velocidades de 350 km/h. Por consiguiente, esto cambia considerablemente el funcionamiento de las variantes de la asignación de MCS. Para llevar a cabo la simulación fueron utilizados los mismos parámetros de simulación de la sección anterior (ver [Tabla 5.1](#)).

La [Figura 5.7](#) muestra la asignación de recursos respecto de el número de usuarios. El algoritmo PMCS AEM propuesto muestra una mayor asignación de la tasa de bits en un intervalo de 10 a 30 usuarios en la celda de LTE. El algoritmo de referencia MMCS AEM muestra una menor asignación de tasa de bits en un intervalo de 10 a 50 usuarios.

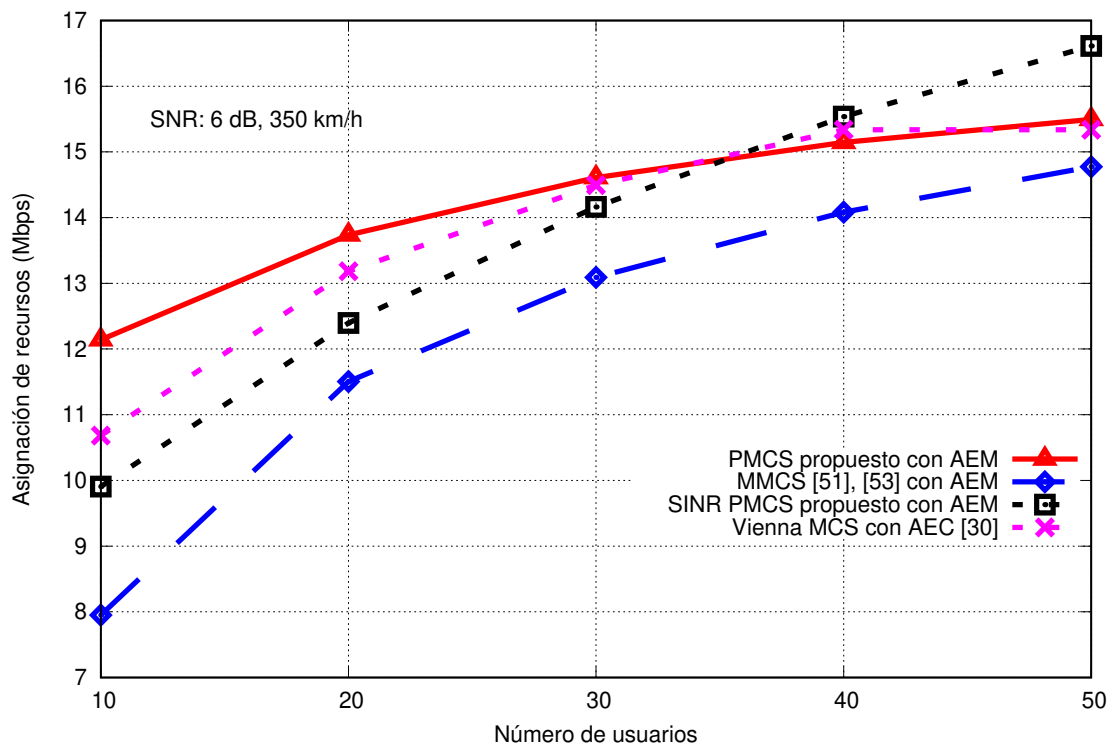


Figura 5.7: Asignación de recursos bajo un SNR de 6 dB a velocidades de 350 km/h.

La Figura 5.8 muestra el rendimiento respecto de el número de usuarios. En un intervalo de 10 a 50 usuarios, el algoritmo PMCS AEM propuesto presenta una mejora del rendimiento. Específicamente en 50 usuarios, el algoritmo PMCS AEM propuesto mejora el rendimiento en un 0.2 %, 10 % y 40 %, comparado con los algoritmos de referencia MMCS AEM y Vienna MCS AEM y el algoritmo SINR PMCS AEM propuesto, respectivamente. En 10, 20 y 30 usuarios, el rendimiento del algoritmo PMCS AEM propuesto tiene un incremento del rendimiento en 15 %, 4 % y 2 %, comparado con el algoritmo MMCS AEM y con respecto de el algoritmo Vienna MCS AEC, el rendimiento del algoritmo PMCS AEM propuesto es -5 %, 3 % y 5 %.

De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 5.8, con una baja cantidad usuarios (20 y 30) en la celda, el algoritmo PMCS AEM propuesto mejora el rendimiento comparado con los algoritmos de referencia MMCS AEM y Vienna MCS AEC. Conforme aumenta el número de usuarios (40 y 50), el rendimiento del algoritmo PMCS AEM propuesto presenta un rendimiento similar al algoritmo MMCS AEM y un incremento del rendimiento comparado con el algoritmo SINR PMCS AEM propuesto.

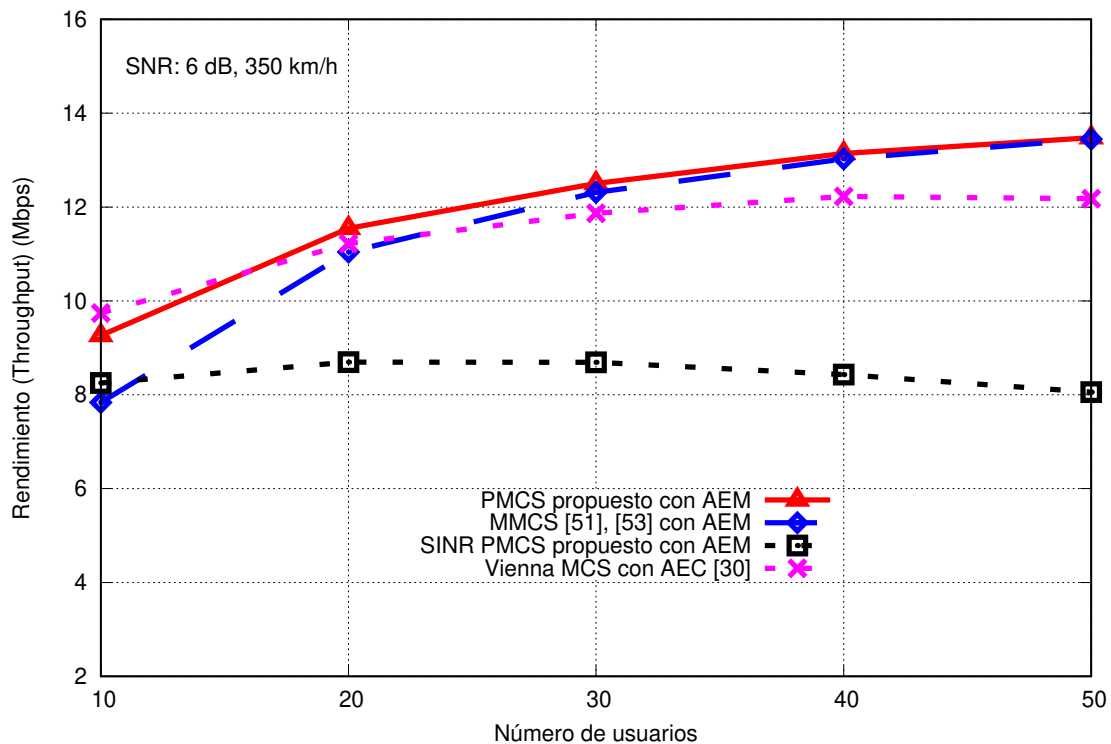


Figura 5.8: Rendimiento (*Throughput*) bajo un SNR de 6 dB a velocidades de 350 km/h.

La Figura 5.9 muestra la justicia respecto de el número de usuarios. En un intervalo de 10 a 40 usuarios, el algoritmo de referencia MMCS AEM presenta una mejor equidad en la asignación de recursos a los usuarios. El algoritmo MMCS AEM mejora la justicia comparado con el algoritmo PMCS AEM propuesto en un 19%, 12%, 9%, 7% y 4% con 10, 20, 30, 40 y 50 usuarios, respectivamente. En 50 usuarios, el algoritmo MMCS AEM presenta un decremento de la justicia en un 7% comparado con el algoritmo Vienna MCS AEC. Finalmente, el algoritmo SINR PMCS AEM propuesto comparado con el algoritmo MMCS AEM presenta un decremento de la justicia de un 7%, 12%, 14%, 16% y 17% con 10, 20, 30, 40 y 50 usuarios, respectivamente.

En cuanto incrementa el número de usuarios, el algoritmo PMCS AEM propuesto tiende a seguir el mismo comportamiento del algoritmo de referencia MMCS AEM. Sin embargo, el algoritmo más justo para velocidades de 350 km/h es el algoritmo de referencia MMCS AEM (10 a 40 usuarios).

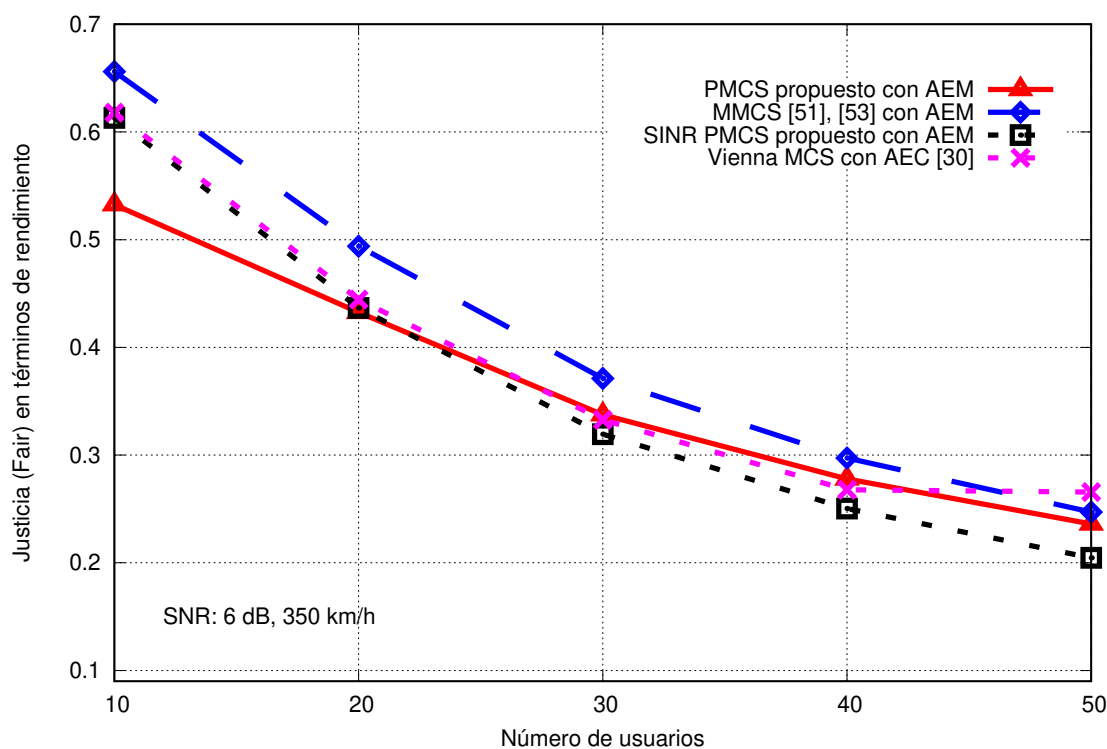
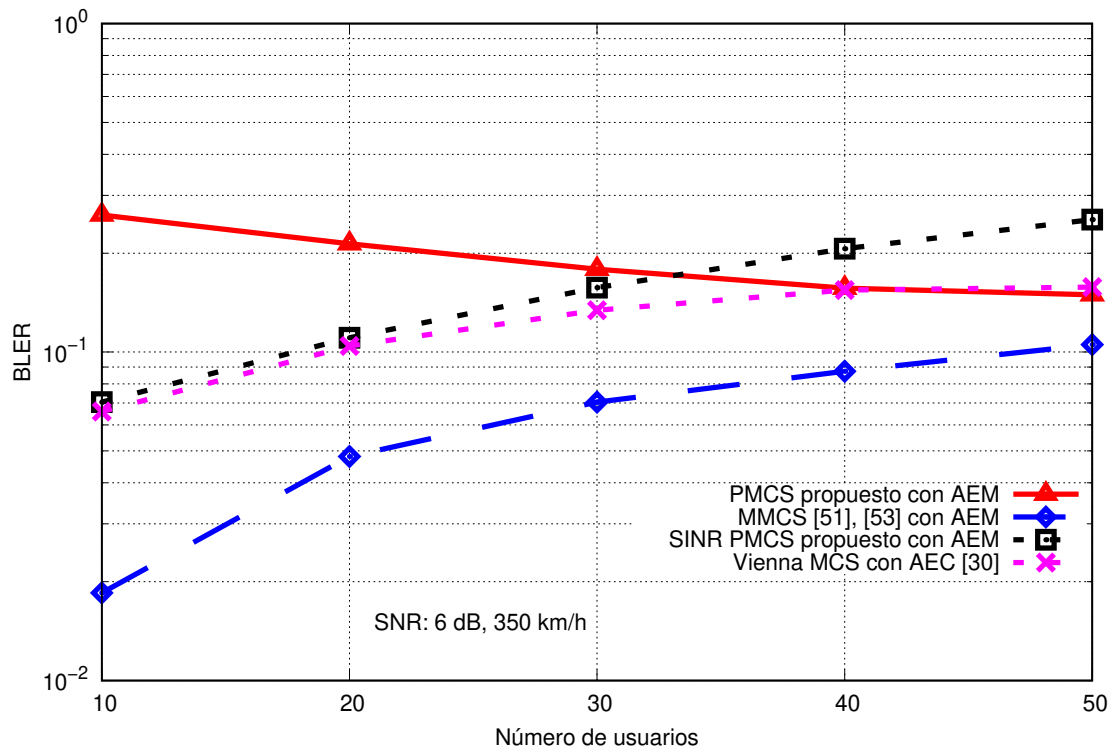


Figura 5.9: Justicia (*Fairness*) bajo un SNR de 6 dB a velocidades de 350 km/h.

La [Figura 5.10](#) muestra el BLER respecto de el número de usuarios. Es importante remarcar que el análisis del BLER es para un escenario de 6 dB y una velocidad de 350 km/h. En un intervalo de 10 a 50 usuarios, el algoritmo PMCS AEM propuesto presenta una tasa de error de bloque mayor al 10 % del BLER. El algoritmo SINR PMCS AEM propuesto tiene una tasa de error de bloque mayor al 10 %, en un intervalo de 10 a 50 usuarios y menor al 10 %, en 10 usuarios. El algoritmo Vienna MCS AEC presenta una tasa de error de bloque mayor al 10 %, en un intervalo de 30 a 50 usuarios y menor al 10 %, en un intervalo de 10 a 20 usuarios. El algoritmo MMCS AEM presenta una tasa de error de bloque menor al 10 % en un intervalo de 10 a 40 usuarios.



[Figura 5.10](#): BLER bajo un SNR de 6 dB a velocidades de 350 km/h.

El algoritmo PMCS AEM propuesto no cumple con una tasa de error de bloque del 10 % en un escenario con 6 dB con una velocidad de 350 km/h. Esto es debido a que el eNB asigna mayor tasa de bits a los usuarios bajo el algoritmo PMCS AEM propuesto. Por consiguiente, el algoritmo PMCS AEM propuesto presenta un BLER mayor al 10 %.

Sin embargo, se puede notar que el BLER del algoritmo PMCS AEM propuesto disminuye conforme el número de usuarios aumenta. Por otra parte, los algoritmos de referencia MMCS AEM, Vienna MCS AEC y el algoritmo SINR PMCS AEM propuesto muestran un aumento del BLER conforme el número de usuarios aumenta. Esto indica, que con una carga considerable de número de usuarios en la celda de LTE los algoritmos MMCS AEM, SINR PMCS AEM propuesto y Vienna MCS AEC conducen a un aumento del BLER, mientras que el algoritmo PMCS AEM propuesto tiende a una disminución del BLER.

Las Tablas 5.9 y 5.10 muestran el BLER y la tasa de transmisión exitosa, respectivamente. El algoritmo MMCS AEM tiene un BLER del 2 %, 5 %, 7 % y 9 %, que corresponde a una tasa de transmisión exitosa de 98 %, 95 %, 93 % y 91 %, con 10, 20, 30 y 40 usuarios, respectivamente. Debido al aumento del BLER en 50 usuarios, no cumple con el valor del 10 % del BLER. El algoritmo PMCS AEM propuesto presenta una disminución del BLER en 26 %, 21 %, 18 %, 16 % y 15 %, con una tasa de transmisión exitosa de 74 %, 79 %, 82 %, 84 % y 85 %, con 10, 20, 30, 40 y 50 usuarios, respectivamente. Los resultados muestran que el algoritmo PMCS AEM propuesto no cumple con el 10 % del BLER y una tasa de transmisión del 90 %. Por esta razón, el receptor en LTE no puede demodular de forma exitosa los paquetes transmitidos por los usuarios.

En 10 usuarios, el algoritmo SINR PMCS AEM propuesto cumple con el 7 % del BLER y una tasa de transmisión exitosa del 93 %, mientras que el algoritmo Vienna MCS AEC, en un intervalo de 10 a 20 usuarios presenta un BLER del 7 % y 10 %, correspondiente a una tasa de transmisión exitosa de 93 % y 90 %, respectivamente.

<b>Usuarios</b>	<b>PMCS con AEM</b>	<b>MMCS con AEM</b>	<b>SINR PMCS con AEM</b>	<b>Vienna MCS con AEC</b>
10	26 %	2 %	7 %	7 %
20	21 %	5 %	11 %	10 %
30	18 %	7 %	16 %	13 %
40	16 %	9 %	21 %	15 %
50	15 %	11 %	25 %	16 %

Tabla 5.9: Comparación de los resultados del BLER con una velocidad de 350 km/h.

Usuarios	PMCS con AEM	MMCS con AEM	SINR PMCS con AEM	Vienna MCS con AEC
10	74 %	98 %	93 %	93 %
20	79 %	95 %	89 %	90 %
30	82 %	93 %	84 %	87 %
40	84 %	91 %	79 %	85 %
50	85 %	89 %	75 %	84 %

**Tabla 5.10:** Comparación de los resultados de la tasa de transmisión exitosa con una velocidad de 350 km/h.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el algoritmo MMCS AEM optimiza la pérdida de recursos de 10 a 40 usuarios en un escenario con un SNR de 6 dB con velocidad de 350 km/h. Sin embargo, para obtener un estudio más amplio del BLER, la siguiente gráfica de desempeño del BLER es analizada bajo diferentes valores de SNR. Esta gráfica nos permite observar la tendencia del algoritmo PMCS AEM propuesto, con valores de SNR mayores a 6 dB y una carga de 50 usuarios en la celda de LTE.

La [Figura 5.11](#) muestra el BLER respecto de el SNR para 50 usuarios. En un intervalo de SNR de 4 a 10 dB, el algoritmo PMCS AEM propuesto cumple con un BLER de al menos del 10 % en valores de la SNR de 8 y 10 dB, mientras que para valores de la SNR de 4 y 6 dB, el algoritmo PMCS AEM propuesto presenta un BLER mayor a la 10 %. Esto significa que el algoritmo PMCS AEM propuesto funciona de forma adecuada para un escenario de 8 y 10 dB de SNR con velocidades de 350 km/h.

Los algoritmos de referencia MMCS AEM, Vienna MCS y el algoritmo SINR PMCS AEM propuesto presentan un BLER menor al 10 %, para un valor de SNR de 4 dB, mientras que para valores mayores a 4 dB, el BLER es mayor al 10 %. Esto significa que los tres algoritmos aseguran una tasa del error de bloque satisfactoria en escenarios con valores de SNR de 4 dB.

Las [Tablas 5.11 y 5.12](#) muestran el BLER y la tasa de transmisión exitosa, respectivamente. El algoritmo PMCS AEM propuesto para valores de SNR de 8 y 10 dB presenta un BLER del 10 % y 5 % correspondiente a una tasa de transmisión exitosa del 90 % y 95 %, respectivamente.

Los algoritmos MMCS AEM, SINR PMCS AEM propuesto y Vienna MCS AEC en un valor de SNR de 4 dB presentan un BLER del 5%, 2% y 7%, correspondiente a un valor de la tasa de transmisión exitosa de 95%, 98% y 93%, respectivamente.

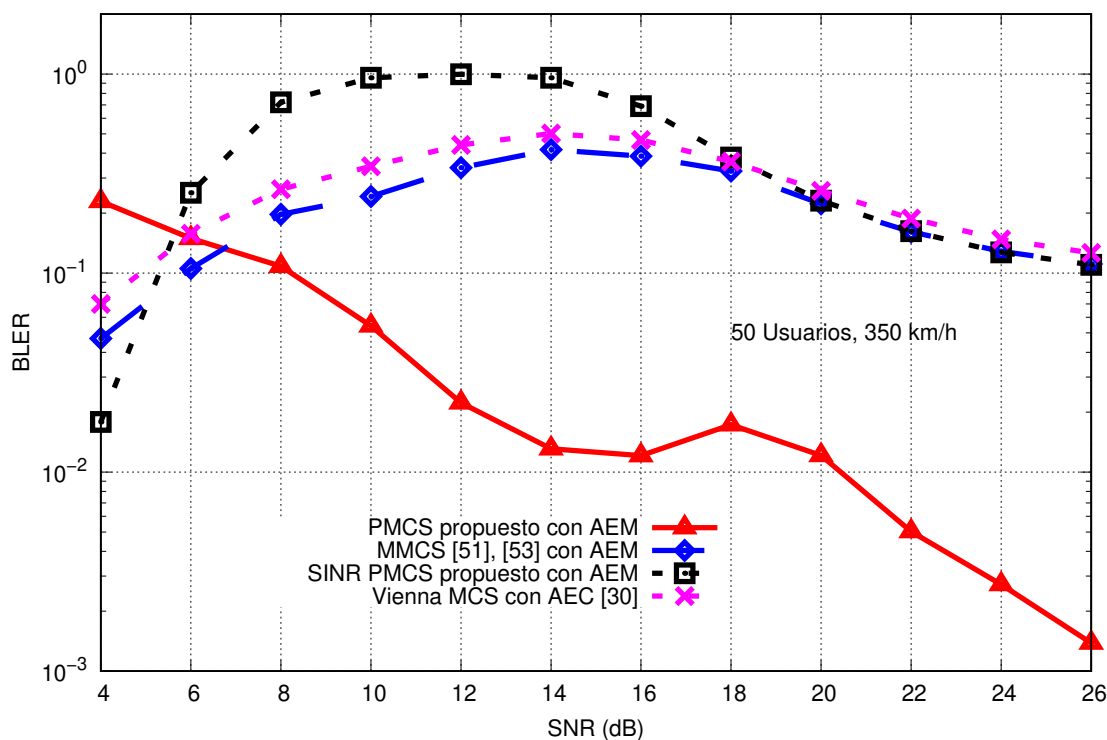


Figura 5.11: BLER respecto de el SNR con una velocidad 350 km/h.

SNR [dB]	PMCS con AEM	MMCS con AEM	SINR PMCS con AEM	Vienna MCS con AEC
4	23 %	5 %	2 %	7 %
6	15 %	11 %	25 %	16 %
8	10 %	20 %	72 %	26 %
10	5 %	24 %	96 %	34 %

Tabla 5.11: Comparación de los resultados del BLER con una velocidad de 350 km/h.



SNR [dB]	PMCS con AEM	MMCS con AEM	SINR PMCS con AEM	Vienna MCS con AEC
4	77 %	95 %	98 %	93 %
6	85 %	89 %	75 %	84 %
8	90 %	80 %	28 %	74 %
10	95 %	76 %	4 %	66 %

Tabla 5.12: Comparación de los resultados de la tasa de tx. exitosa con vel. de 350 km/h.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el algoritmo PMCS AEM propuesto disminuye la pérdida de recursos de radio en escenarios con valores de SNR de 8 y 10 dB, velocidades de 350 km/h y 50 usuarios en la celda de LTE. Para un escenario con una SNR de 4 dB y 50 usuarios, los algoritmos de referencia MMCS AEM y Vienna MCS AEC y el algoritmo SINR PMCS AEM propuesto mantienen una pérdida de recursos de radio aceptable. El algoritmo MMCS AEM funciona adecuadamente en escenarios menores a 50 usuarios en la celda de LTE y en entornos, con valores de SNR de 6 dB y velocidades de 350 km/h.

La Figura 5.12 muestra la eficiencia espectral respecto de el número de usuarios. En un escenario de SNR de 6 dB y 50 usuarios, el algoritmo PMCS AEM propuesto tiene un eficiencia espectral mayor en un 4 %, 1 % y 4 %, comparado con los algoritmos MMCS AEM, SINR PMCS AEM propuesto y Vienna MCS AEC, respectivamente. Para un número de usuarios menor a 50, el algoritmo PMCS AEM propuesto presenta una mayor tasa de bits comparados con los otros algoritmos analizados. Esto confirma que el algoritmo PMCS AEM propuesto tiende a perder los recursos de radio en escenarios con valores de SNR de 6 dB velocidades de 350 km/h.

Cabe destacar que, la eficiencia espectral aumenta conforme el número de usuarios aumenta. Esto significa que conforma incrementa el número de usuarios en la celda de LTE, la eficiencia espectral tiende a mejorar.

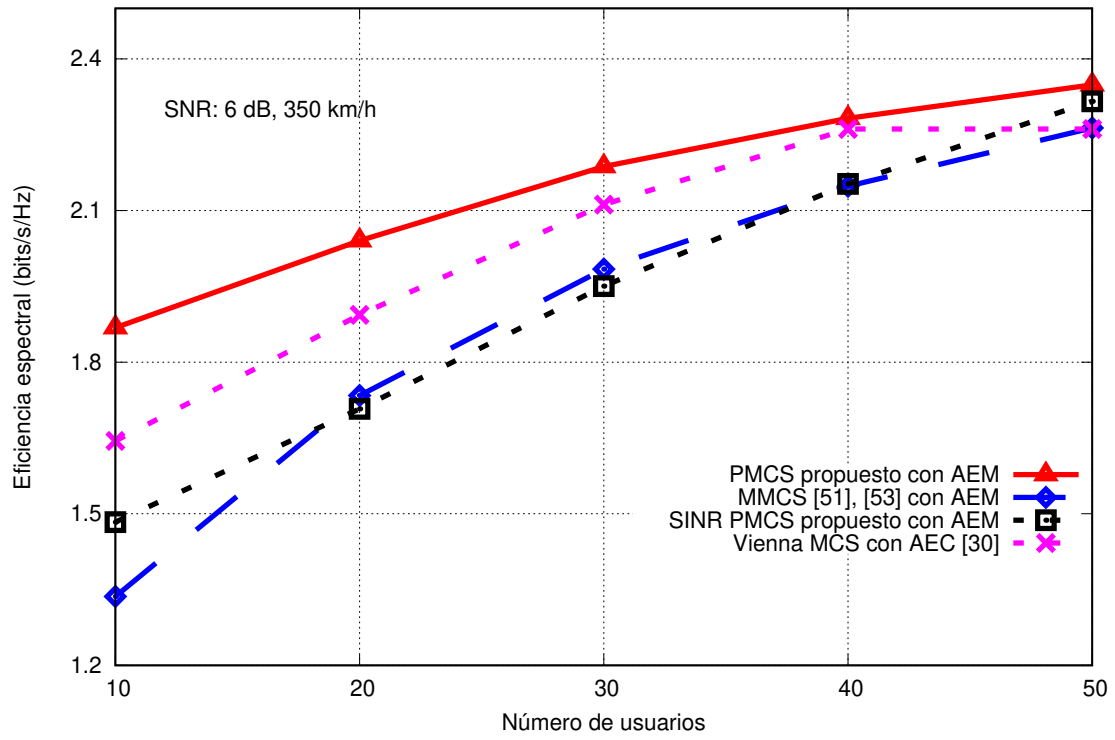
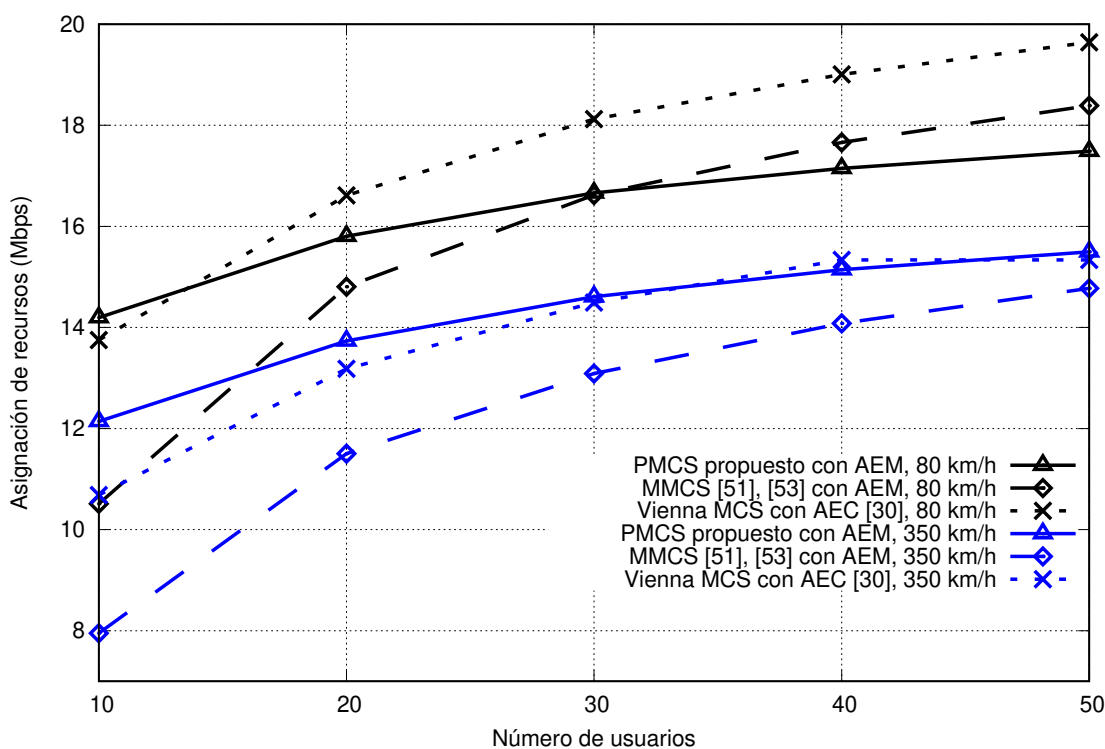


Figura 5.12: Eficiencia espectral respecto de el número de usuarios con una velocidad de 350 km/h.

## 5.4. Evaluación de desempeño bajo dos diferentes velocidades, 80 km/h y 350 km/h

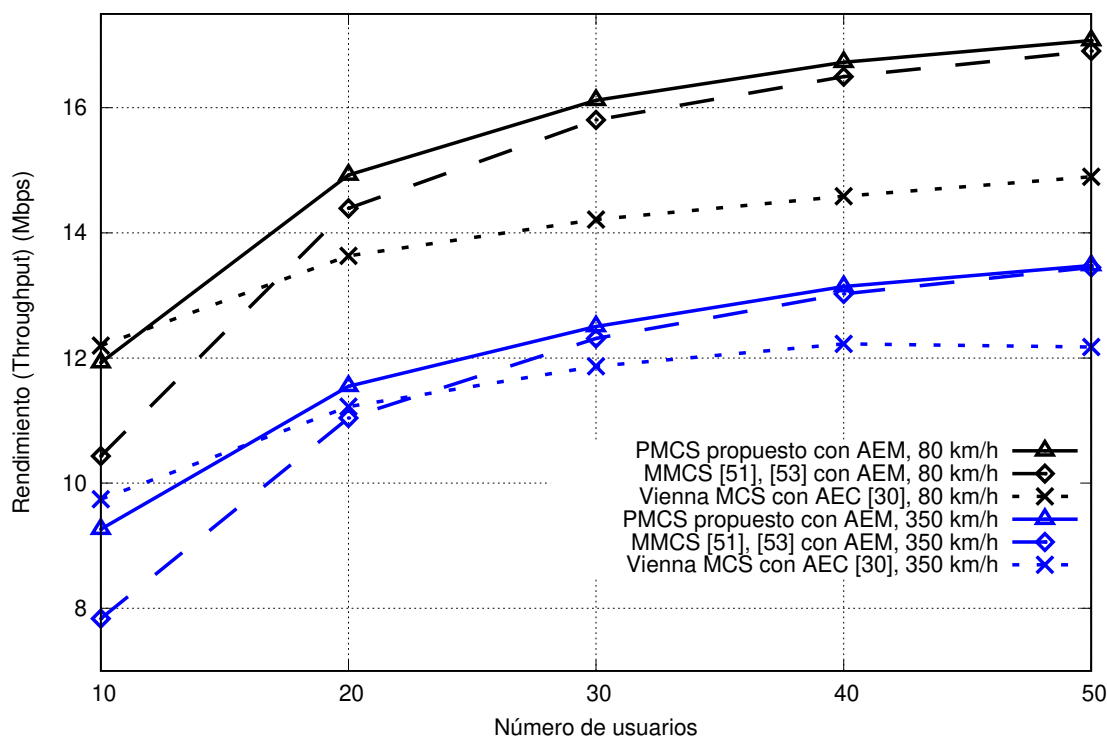
En esta sección se comparan los algoritmos presentados en este trabajo de tesis bajo dos diferentes velocidades, 80 km/h y 350 km/h. La evaluación es realizada empleando el simulador de LTE a nivel de enlace con los mismos parámetros de simulación de las 2 secciones anteriores. Estas pruebas permiten analizar el desempeño de los algoritmos conforme aumenta la velocidad de los usuarios en la celda de LTE.

La [Figura 5.13](#) muestra la asignación de recursos respecto de el número de usuarios. Los algoritmos a un velocidad de 350 km/h presentan un decremento en la asignación de la tasa de bits a los usuarios. Este comportamiento confirma que la asignación de recursos decremента conforme el canal inalámbrico incrementa su variabilidad en el tiempo (fluctuaciones rápidas).



[Figura 5.13](#): Asignación de recursos bajo un SNR de 6 dB con dos diferentes velocidades de 80 km/h y 350 km/h.

La [Figura 5.14](#) muestra el rendimiento respecto de el número de usuarios con velocidades de 80 km/h y 350 km/h. Los algoritmos evaluados con una velocidad de 350 km/h muestran una degradación del rendimiento, con respecto a los algoritmos con una velocidad de 80 km/h. Los resultados del rendimiento se muestra en la [Tabla 5.13](#).



[Figura 5.14](#): Rendimiento bajo un SNR de 6 dB con dos diferentes velocidades de 80 km/h y 350 km/h.

La [Tabla 5.13](#) muestra el decremento del rendimiento de los algoritmos, a una velocidad de 80 km/h, con respecto de una velocidad de 350 km/h en la celda de LTE. En promedio, los algoritmos PMCS AEM propuesto, MMCS AEM y Vienna MCS AEC presentan una disminución del rendimiento en 3.6, 3 y 2.2 Mbps, respectivamente. Por lo tanto, el algoritmo PMCS AEM propuesto y el algoritmo de referencia MMCS AEM pierden mayor cantidad del rendimiento de la celda de LTE con altas velocidades. Esto es debido a que ambos algoritmos, de forma independiente, proporcionan un mayor rendimiento al usuario en comparación con el algoritmo Vienna MCS AEC.

Usuarios	PMCS con AEM [Mbps]	MMCS con AEM [Mbps]	Vienna MCS con AEC [Mbps]
10	3	3	2
20	3	3	2
30	4	3	2
40	4	3	2
50	4	3	3
Promedio	3.6	3	2.2

Tabla 5.13: Diferencia entre el rendimiento bajo velocidades de 350 km/h y 80 km/h.

De los resultados obtenidos, se observa que, cuando incrementa la velocidad de los usuarios, el rendimiento decremanta de forma significativa en la celda de LTE a nivel de enlace.

La Figura 5.15 muestra el BLER, respecto de la SNR, para ambas velocidades de 80 km/h y 350 km/h, con 50 usuarios en la celda de LTE.

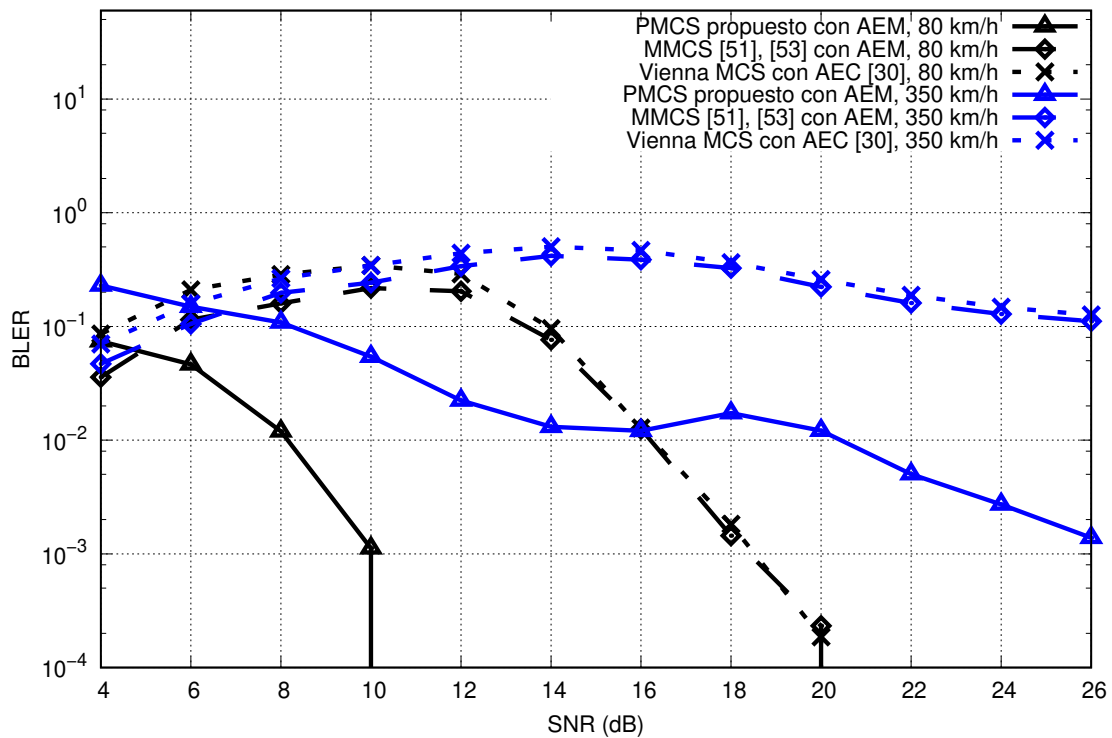


Figura 5.15: BLER a diferentes valores de SNR y con velocidades de 80 km/h y 350 km/h.

Con el objetivo de comparar los algoritmos, en términos de tasa del error de bloque, la [Tabla 5.14](#) muestra el resumen con los valores del BLER, para cada algoritmo con su respectiva velocidad. Como era de esperarse, existe un incremento del BLER en cuanto los usuarios cambian de velocidad de 80 km/h a 350 km/h.

El algoritmo PMCS AEM propuesto presenta un incremento en la tasa del error de bloque del 16 %, 10 %, 9 % y 4.9 %, con un SNR de 4, 6, 8 y 10 dB (ver [Tabla 5.15](#)), respectivamente. El mismo comportamiento se observa en el algoritmo MMCS AEM, con un incremento de la tasa del error de bloque de 1 %, 0 %, 4 % y 2 %, con un SNR de 4, 6, 8, 10 dB (ver [Tabla 5.15](#)), respectivamente. Cuando el usuario experimenta un cambio de velocidad de 80 km/h a 350 km/h, el algoritmo Vienna MCS AEC presenta un decremento de la tasa de error en un 2 %, 5 %, 3 % y 0 %, con un SNR de 4, 6, 8 y 10 dB (ver [Tabla 5.15](#)), respectivamente.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el algoritmo PMCS AEM propuesto y el algoritmo MMCS AEM presentan un incremento de la tasa del error de bloque cuando los usuarios cambian de velocidad de 80 km/h a 350 km/h. Esto es debido a que, cuando incrementa la velocidad del usuario, el canal inalámbrico entre el transmisor y receptor incrementa su variabilidad en el tiempo ocasionado por fluctuaciones rápidas más severas y, en consecuencia, un incremento de la pérdida de los recursos de radio. Esto significa que la adaptación de enlace mejorado (AEM), junto con la variantes de la asignación de CQI, trabajan de forma adecuada, incluso cuando existen cambios en la calidad de señal de las subportadoras del usuario. Por otra parte, cuando existe un cambio de velocidad de 80 km/h a 350 km/h, la tasa del error de bloque se decrementa. Este comportamiento es observado en el algoritmo Vienna MCS AEC que decrementa la tasa del error de bloque. Por lo tanto, la adaptación de enlace clásico (AEC) no se está adaptando a las condiciones reales del canal.

La comparación de los algoritmos con diferentes valores de velocidades permite evaluar la adaptación de enlace mediante el BLER. El BLER incrementa cuando la velocidad del usuario incrementa, esto es un indicador de que la adaptación de enlace se realiza de forma correcta al canal inalámbrico. Sin embargo, cuando la adaptación de enlace no se logra de forma satisfactoria, el BLER decrementa en cuanto la velocidad del usuario incrementa. Se confirma que el AEM propuesto en este trabajo de tesis se adapta al canal inalámbrico de forma adecuada, mientras que el AEC no se adapta de forma satisfactoria a los efectos de la variabilidad del canal en el dominio del tiempo.

SNR [dB]	PMCS	PMCS	MMCS	MMCS	Vienna MCS	Vienna MCS
	AEM 80 km/h	AEM 350 km/h	AEM 80 km/h	AEM 350 km/h	AEC 80 km/h	AEC 350 km/h
4	7 %	23 %	4 %	5 %	9 %	7 %
6	5 %	15 %	11 %	11 %	21 %	16 %
8	1 %	10 %	16 %	20 %	29 %	26 %
10	0.1 %	5 %	22 %	24 %	34 %	34 %

Tabla 5.14: Incremento y decremento del BLER a velocidades de 80 km/h y 350 km/h.

SNR [dB]	PMCS AEM	MMCS AEM	Vienna MCS AEC
4	16 %	1 %	-2 %
6	10 %	0 %	-5 %
8	9 %	4 %	-3 %
10	4.9 %	2 %	0 %

Tabla 5.15: Comparación del BLER a velocidades de 80 km/h y 350 km/h.

# Conclusiones

## Conclusiones generales

En atención a los objetivos propuestos en este trabajo de tesis, se desarrollaron e implementaron tres módulos que permiten la asignación de recursos en la tecnología evolución a largo plazo (LTE, por sus siglas en inglés): 1) el algoritmo de asignación de recursos, expansión máxima recursiva (RME, por sus siglas en inglés), 2) la adaptación de enlace mejorado y 3) la variante de asignación del esquema de modulación y codificación (MCS, por sus siglas en inglés) a través del índice del indicador de la calidad de canal (CQI, por sus siglas en inglés).

En atención a la restricción de la asignación contigua (adyacencia) del bloque de recurso (RB, por sus siglas en inglés), se desarrolló una simulación Monte Carlo para evaluar los dos modelos de asignación de grupos de subportadoras: la localizada y la distribuida. La asignación localizada reduce el consumo de potencia del usuario móvil de forma significativa, en el enlace de subida de LTE. Por lo tanto, la asignación de RB contigua fue considerada en el diseño del algoritmo RME.

En atención a la mejora de la adaptación de enlace, se desarrolló un análisis teórico y simulado de la adaptación de enlace clásico (AEC) para detectar la deficiencia del algoritmo. Con base en el análisis realizado se propuso una mejora al AEC, dando lugar a la adaptación de enlace mejorado (AEM). El AEM propuesto proporciona diversos valores del cociente de la potencia de la señal sobre la interferencia más ruido (SINR, por sus siglas en inglés) efectivo para cada usuario y, por lo tanto, diferentes índices de CQI. Esto conlleva a la selección de diferentes MCS que conducen a que el usuario presente una mejor adaptación en canales de alta movilidad y valores bajos del cociente de la señal a ruido (SNR, por sus siglas en inglés) (para el caso vehículo-infraestructura).



En atención a la asignación del CQI, tomando en cuenta diferentes variantes de asignación del MCS, se propusieron dos variantes de la asignación del MCS: 1) SINR PMCS (esquema de modulación y codificación promedio) y 2) PMCS. Esto con la finalidad de reducir la pérdida de recursos en canales variantes en el tiempo.

La variante PMCS propuesta reduce significativamente la tasa de error y, evidentemente, mejora la tasa de transmisión exitosa. Por lo tanto, se reduce la pérdida de recursos de radio en canales vehículo-infraestructura.

En atención al diseño del algoritmo de asignación de recursos, se diseñó e implementó el algoritmo heurístico RME, en el simulador LTE Vienna v1.5 de enlace de subida. El algoritmo se desarrolló bajo el tipo de asignación localizada.

En atención a la evaluación de los algoritmos con diferentes velocidades, las simulaciones se desarrollaron con diferente número de usuarios, bajo dos velocidades, 80 km/h y 350 km/h, con valores promedio de SNR de 6 dB y fluctuaciones rápidas. Estas características permiten emular un canal vehículo-infraestructura en el simulador de LTE. Finalmente, se presentaron gráficas de los resultados de la simulación con las siguientes métricas: 1) asignación de recursos, 2) rendimiento, 3) justicia, 4) tasa error de bloque con diferente número de usuarios, 5) tasa de error de bloque con diferente valor de SNR y 6) eficiencia espectral.

En atención al estudio y evaluación de desempeño de los algoritmos implementados, se evaluaron conjuntamente los algoritmos de la siguiente forma: 1) RME-PMCS-AEM, 2) RME-SINR-PMCS-AEM, 3) RME-Vienna MCS-AEC y 4) RME-MMCS-AEM. Los algoritmos RME-PMCS (propuesto)-AEM (propuesto) y RME-MMCS (referencia)-AEM (propuesto) presentaron una mejora significativa del rendimiento del 15 % y 13 %, comparado con el algoritmo RME-Vienna MCS (referencia)-AEC (referencia), respectivamente. Además, el algoritmo RME-PMCS (propuesto)-AEM (propuesto) con 50 usuarios en la celda de LTE, presentó una tasa de transmisión exitosa del 93 %, 95 %, 99 % y 99.9 %, para valores de SNR de 4, 6, 8, 10 dB, respectivamente.

En atención de la publicación de resultados, el análisis teórico, diseño e implementación de los algoritmos y gráficas resultantes, fueron plasmados en un artículo de investigación, el cual fue publicado en la revista *Elektronika ir Elektrotechnika*.

# Verificación de la hipótesis

Retomando la hipótesis propuesta en la [sección 1.4](#):

*“La asignación inadecuada del índice del indicador de la calidad de canal (CQI, por sus siglas en inglés), un algoritmo de asignación de recursos no adaptado al enlace de subida de LTE y una adaptación de enlace no optimizada para canales vehículo-infraestructura, conducen a una degradación considerable del rendimiento del sistema LTE y una pérdida considerable de los recursos de radio. El estudio y abordaje conjunta del índice de CQI, asignación de recursos de radio y adaptación de enlace, proporcionan mayores elementos de decisión para la asignación de recursos que mejoren el rendimiento y la tasa de error de bloque del sistema de LTE en canales inalámbricos con valores bajos del cociente de la potencia de la señal sobre la potencia del ruido (SNR, por su siglas en inglés) y fluctuaciones rápidas”.*

Para verificar la hipótesis presentada en este trabajo de tesis, se tiene lo siguiente:

La [Figura 5.16](#) muestra que el algoritmo SINR PMCS AEM propuesto obtiene una mayor asignación de tasa de bits, comparado con el algoritmo PMCS AEM propuesto y los algoritmos de referencia, MMCS AEM y Vienna MCS AEC.

La [Figura 5.17](#) muestra un mayor rendimiento para el algoritmo PMCS AEM propuesto comparado con los algoritmos de referencia MMCS AEM y Vienna MCS AEC y el algoritmo SINR PMCS AEM propuesto. Es notorio que, el algoritmo SINR PCMS AEM propuesto asignó una significativa cantidad de tasa de bits a los usuarios, sin embargo, muestra un decremento significativo del rendimiento en la celda de LTE. Por tal motivo, se confirma que la mayor asignación de tasa de bits a un usuario no garantiza un buen rendimiento en canales vehículo-infraestructura.

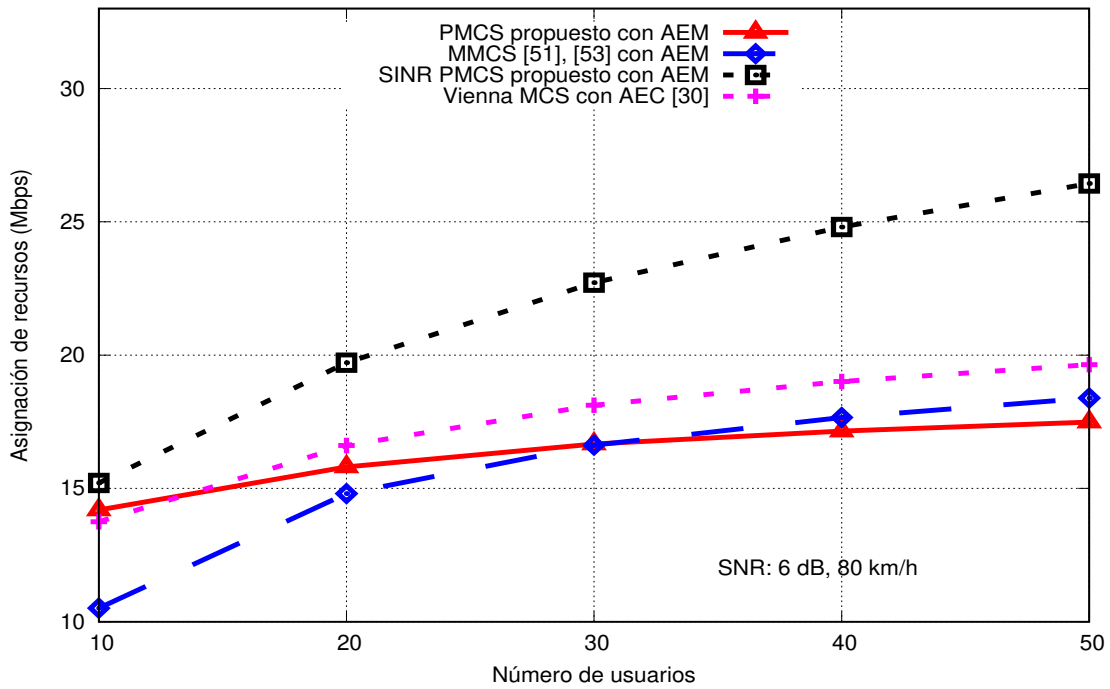


Figura 5.16: Asignación de recursos a los usuarios con una velocidad de 80 km/h.

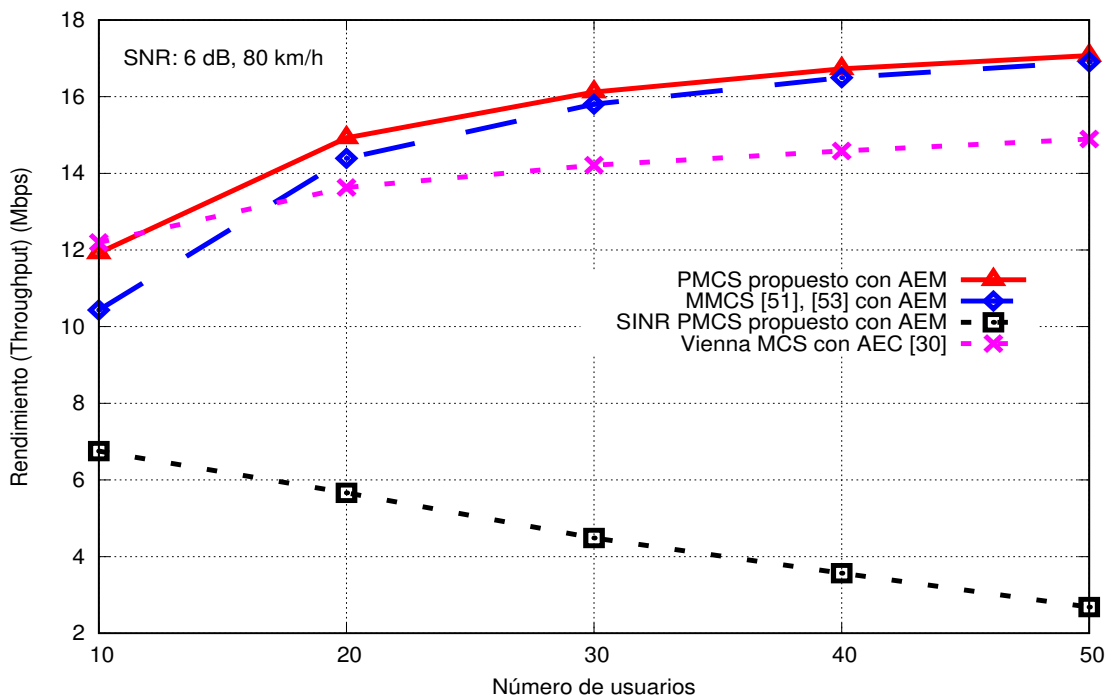


Figura 5.17: Rendimiento (*Throughput*) con un SNR de 6 dB con una velocidad de 80 km/h.

En la [Figura 5.18](#) se muestra que el algoritmo PMCS AEM propuesto presenta un tasa de error del bloque menor al 10 %, en un intervalo de SNR de 6 a 10 dB. Con esto, se confirma que, el algoritmo PMCS AEM propuesto evita la pérdida significativa de recursos de radio en un canal vehículo-infraestructura. Por todo lo anterior, se confirma que limitar la tasa de bits a los usuarios, mediante la asignación del índice de CQI, conduce a una menor pérdida de la tasa de datos en un canal altamente variable en el tiempo. Además, la adaptación de enlace mejorado permite una predicción más precisa de la calidad de las subportadoras para obtener diversos valores de SINR efectivo y, por consiguiente, una asignación diversa del MCS al usuario. Con base en los resultados reportados, se verifica nuestra hipótesis presentada en este trabajo de tesis.

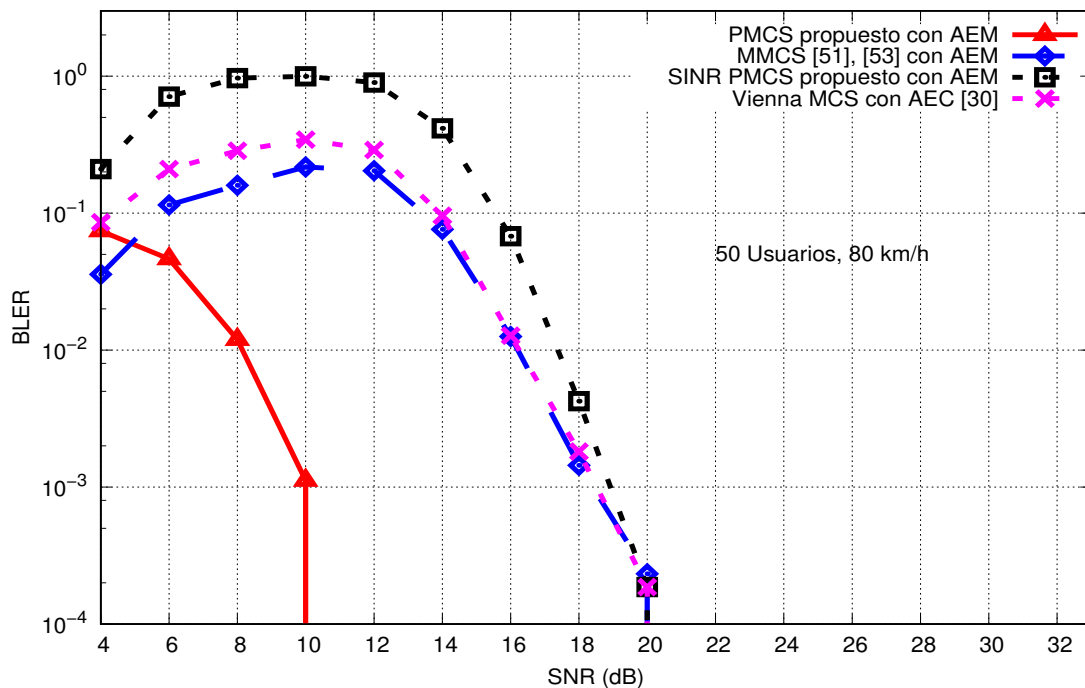


Figura 5.18: BLER con 50 usuarios a diferentes valores de SNR con un velocidad de 80 km/h.

# Trabajo futuro

En principio el estándar 5G considera al esquema de acceso múltiple SC-FDMA para su transmisión sobre el enlace de subida. Por lo tanto, se considera que es posible implementar los modelos propuestos en este trabajo de tesis en un sistema de 5G, mediante la modificación del espacio de ancho de banda de cada subportadora del bloque de recurso de LTE. Esto con la finalidad de cumplir con el requerimiento de la numerología de 5G y, además proporcionar mayor robustez a la transmisión de datos en un canal del tipo vehículo-infraestructura.

Algunas posibles líneas de investigación, con base en este trabajo de tesis, se sugieren a continuación:

- Implementar la asignación de los RB para que el ancho de banda entre subportadores sea dinámico.
- Implementar los algoritmos presentados en este trabajo de tesis, en un simulador a nivel de sistema, para obtener la métrica de latencia para un canal vehículo-infraestructura.
- Investigar la posibilidad de adaptar el algoritmo de adaptación de enlace mejorado a las formas de onda propuestas para 5G, tales como multi-portadora, mediante bancos de filtro (FBMC, por sus siglas en inglés), multi-portadora de filtrado universal (UFMC, por sus siglas en inglés), multiplexación por división de frecuencia generalizado (GDFM, por sus siglas en inglés) y las diversas variantes de OFDM.
- Implementar la adaptación de enlace mejorado y las variantes de MCS en LTE para comunicaciones dispositivo a dispositivo (D2D, por sus siglas en inglés).

# Trabajo de investigación publicado

El artículo resultado del trabajo de investigación aquí presentado es el siguiente:

A. Gutierrez, V. Rangel, J. Gomez, R. M. Edwards, and D. Covarrubias, "A joint modulation-coding scheme and resource allocation in LTE uplink", in *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 26, No. 5, pp. 50-58, 2020.

# Referencias

- [1] C. Lottermann, M. Botsov, P. Fertl, R. Müllner, G. Araniti, C. Campolo, M. Condoluci, A. Iera, and Antonella Molinaro, “LTE for vehicular communications”, in *SPRINGER Vehicular Ad Hoc Networks Book*, Chapter 16, pp. 457-501, 2015.
- [2] G. Araniti, C. Campolo, M. Condoluci, A. Lera, and A. Molinaro, “LTE for vehicular networking: A survey”, in *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 5, pp. 148-157, May 2013.
- [3] Z. H. Mir, and F. Filali, “LTE and IEEE 802.11p for vehicular networking: a performance evaluation”, in *EURASIP Journal on Wireless Communications*, vol. 2014, no. 1, pp. 1-15, 2014.
- [4] C. Campolo, A. Molinaro, and R. Scopigno, “From today’s VANETs to tomorrow’s planning and the bets for the day after”, in *ELSEVIER Vehicular Communications Journal*, vol. 2, no. 3, pp. 158-171, July 2015.
- [5] K. Zheng, Q. Zheng, P. Chatzimisios, W. Xiang and, Y. Zhou, “Heterogeneous vehicular networking: A survey on architecture, challenges and solutions”, in *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2377-2395, Nov. 2015.
- [6] C. Ide, L. Habel, T. Knaup, M. Schreckenberg, and C. Wietfeld, “Interaction between machine-type communication and H2H LTE traffic in vehicular environments”, in *IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring 2014)*, pp. 1-5, 2014.
- [7] Q. Zheng, K. Zheng, L. Sun, and C. M. Victor, “Dynamic performance analysis of uplink transmission in cluster-based heterogeneous vehicular networks”, in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 12, pp. 5584-5595, 2015.

- [8] S. Wang, L. Le, N. Zahariev, and K. Leung, “Centralized rate control mechanism for cellular-based vehicular networks”, in *IEEE, Global Communications Conference (GLOBECOM 2013)*, pp. 4914-4920, Dec. 2013.
- [9] A. Gutierrez, V. Rangel, J. Gomez, R. M. Edwards, and D. Covarrubias, “A joint modulation-coding scheme and resource allocation in LTE uplink”, in *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 26, No. 5, pp. 50-58, 2020.
- [10] K. Rehbehn, “LTE and the anticipation of 5G”, in *451 Research, Intel*, April 2017
- [11] G. Ku, and J. M. Walsh, “Resource allocation and link adaptation in LTE and LTE Advanced: A tutorial”, in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1605-1633, 2015.
- [12] J. P. Choi, J. Shin, J. Lee, H. Lou, and J. Choi, “A universal resource allocation method for H-FDD, FDD and TDD wireless OFDM systems”, in *IEEE International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, pp. 930-935, 2014.
- [13] Instituto Federal de Telecomunicaciones, “El espectro radieléctrico en México. Estudio y acciones”, <http://www.ift.org.mx/conocenos/pleno/integrantes-del-pleno/espectro-radioelectrico>.
- [14] F. Khan, “LTE for 4G mobile broadband: Air interface technologies and performance”, *Cambridge University Press*, 2009
- [15] ETSI 136 211 v8.9.0, “LTE; evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical channels and modulation”, 2010.
- [16] N. Abu-Ali, A-E. Taha, M. Salah, and H. Hassanein, “Uplink scheduling in LTE and LTE-Advanced: Tutorial, survey and evaluation framework”, in *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1239-1265, 2014.
- [17] C. Ciochina, and H. Sari, “A review of OFDMA and single-carrier FDMA”, in *IEEE European Wireless Conference (EW)*, pp. 706-710, 2010.



- [18] G. G. Lema, T. B. Reda, and D. H. Hailu, "LTE quality of service enhancement under OFDM modulation techniques", in *SPRINGER Wireless Personal Communications*, vol. 113, pp. 995-1008, 2020.
- [19] M. M. Rana, "Performance of sub-carrier mapping in single carrier fdma system under radio mobile channels", in *IEEE 13th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)*, pp. 175-180, 2011.
- [20] H. G. Myung, J. Lim, and D. J. Goodman, "Single carrier FDMA for uplink wireless transmission", in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 1, no. 3, pp. 30-38, 2006.
- [21] H. G. Myung, "Introduction to single carrier FDMA", in *IEEE 15th European Signal Processing Conference*, pp. 2144-2148, 2007.
- [22] H. Safa, and K. Tohme, "LTE uplink scheduling algorithms : Performance and challenges", in *IEEE 19th International Conference Telecommunications (ICT 2012)* , pp. 1-6, 2012.
- [23] E. E. Tsiropoulou, A. Kapoukakis, and S. Papavassiliou, "Uplink resource allocations in SC-FDMA wireless networks: A survey and taxonomy", in *ELSEVIER Computer Networks*, vol. 96, pp. 1-28, 2016.
- [24] M. Q. Abdulhasan, M. I. Salman, C. K. Ng, N. K. Noordin, S. H. Hashim, and F. Hashim, "An adaptive threshold feedback compression scheme based on channel quality indicator (CQI) in long term evolution (LTE) system", *SPRINGER Wireless Personal Communications*, vol. 82, no. 4, pp. 2323-2349, 2015.
- [25] P. Bertrand, J. Jiang, and A. Ekpenyong, "Link adaptation control in LTE uplink", in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall 2012)*, pp. 1-5, 2012.
- [26] E. Shin, and J. Shin, "Sounding reference signal measurement in LTE system", in *IEEE 18th Advanced Communication Technology (ICACT 2016)*, pp. 755-758, 2016.
- [27] H. Sahlin, "Channel prediction for link adaptation in LTE uplink", in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall 2012)*, pp. 1-5, 2012.

- [28] G. A. Laguna, and A. Prieto, “Simulador montecarlo para esquema básico de comunicación OFDM sobre la red eléctrica”, 2011.
- [29] C. Mehlführer, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska, and M. Rupp, “Simulating the long term evolution physical layer”, in *IEEE 17th Signal Processing Conference European*, pp. 1471-1478, 2009.
- [30] M. Jar, and G. Fettweis, “Throughput maximization for LTE uplink via resource allocation”, in *IEEE Wireless Communication Systems (ISWCS 2012)*, pp. 146-150, 2012.
- [31] J. Lim, H. G. Myung, K. Oh, and D. J. Goodman, “Proportional fair scheduling of uplink single-carrier FDMA systems”, in *IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication (PIMRC 2006)*, pp. 1-6, 2006.
- [32] G. Huang, A. Nix, and S. Armour, “Decision feedback equalization in SC-FDMA”, in *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2008)*, pp. 1-5, 2008
- [33] E. Zöchmann, S. Schwarz, S. Pratschner, L. Nagel, M. Lerch, and M. Rupp, “Exploring the physical layer frontiers of cellular uplink”, in *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2016, no. 1, pp. 1-18, 2016.
- [34] J. Blumenstein, J. Ikuno, J. Prokopec, and M. Rupp, “Simulating the long term evolution uplink physical layer”, in *IEEE Proceedings ELMAR (2011)*, pp. 141-144, Sept. 2011.
- [35] L. A. M. Ruiz de Temiño, G. Berardinelli, S. Frattasi, and P. Mogensen, “Channel-Aware scheduling algorithms for SC-FDMA in LTE uplink”, in *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2008)*, pp. 1-6, 2008.
- [36] P. Wen, M. You, S. Wu, and J. Liu, “Scheduling for streaming application over wideband cellular network in mixed service scenarios”, in *IEEE Military Communications Conference*, pp. 1-7, 2007.
- [37] O. Delgado, and B. Jaumard, “Scheduling and resource allocation for multiclass services in LTE uplink systems”, in *IEEE 6th International Conference Wireless and Mobile Computing, Network and Communications (WiMob)*, pp. 355-360, 2010.

- [38] M. Anas, C. Rosa, F. Calabrese, K. Pedersen, and P. Mogensen, "Combined admission control and scheduling for QoS differentiation in LTE uplink", in *IEEE 68th Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1-5, 2008.
- [39] F. Sokmen, and T. Girici, "Uplink resource allocation algorithms for Single-Carrier FD-MA systems", in *Wireless Conference (EW)*, pp. 339-345, 2010.
- [40] J. Lim, H.G. Myung, and K. Oh, "Channel-Dependent scheduling of uplink single carrier FDMA systems", in *IEEE 64th Vehicular Technology Conference, (VTC Fall 2006)*, pp. 1-5, 2006.
- [41] F. D. Calabrese, P. H. Michaelsen, C. Rosa, M. Anas, C. U. Castellanos, D. L. Villa, K. Pedersen, and P. Mogensen, "Search-tree based uplink channel aware packet scheduling for UTRAN LTE", in *IEEE 67th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1949-1953, 2008.
- [42] E. Balas, and M. Padberg, "Set partitioning: a survey", *SIAM Rev.* 18 (4), 1976.
- [43] D. Kim, J. Kim, H. Kim, K. Kim, and Y. Han, "An efficient scheduler for uplink single carrier FDMA system", in *IEEE 21st International Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1348-1353, 2010.
- [44] W. Pao, Y. Chen, "Chunk allocation schemes for SC-FDMA systems", in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1-5, 2010.
- [45] F. Calabrese, C. Rosa, M. Anas, P. Michaelsen, K. Pedersen, and P. Mogensen, "Adaptive transmission bandwidth based packet scheduling for LTE uplink", in *IEEE 68th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, pp. 1-5, 2008.
- [46] C.-H. Chang, H.-L. Chao, and C.-L. Liu, "Sum throughput-improved resource allocation for LTE uplink transmission", in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall 2011)*, pp. 1-5, 2011.
- [47] M. Al-Rawi, R. Jantti, J. Torsner, and M. Sagfors, "On the performance of heuristic opportunistic scheduling in the uplink of 3G LTE networks", in *IEEE 19th International Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1-6, 2008.

- [48] S. B. Lee, I. Pefkianakis, A. Meyerson, S. Xu, and S. Lu, "Proportional fair frequency-domain packet scheduling for 3GPP LTE uplink", in *IEEE INFOCOM (2009)*, pp. 2611-2616, 2009.
- [49] F. Liu, X. She, L. Chen, and H. Otsuka, "Improved recursive maximum expansion scheduling algorithms for uplink single carrier FDMA system", in *IEEE 71st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1-5, 2010.
- [50] O. Delgado, and B. Jaumard, "Scheduling and resource allocation in LTE uplink with a delay requirement", in *Proceedings of the 8th Annual Communication Networks and Services Research Conference (CSNR)*, pp. 268-275, 2010.
- [51] Y. Chen, I. Peng, and C. Lai, "Study of radio resource allocation scheme for single carrier FDMA in LTE network", in *IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1-5, 2012.
- [52] S. Cicalo, and V. Tralli, "Adaptive resource allocation with proportional rate constraints for uplink SC-FDMA systems", in *IEEE Communications Letter*, vol. 18, no. 8, pp. 1419-1422, 2014.
- [53] M. Zhang, and Y. Zhu, "An enhanced greedy resource allocation algorithm for localized SC-FDMA systems", in *IEEE Communications Letter*, vol. 17, no. 7, pp. 1479-1482, 2013.
- [54] F. Z. Kaddour, E. Vivier, L. Mroueh, M. Pischella, and P. Martins, "Green opportunistic and efficient resource block allocation algorithm for LTE uplink networks", in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 10, pp. 4537-4550, 2015.
- [55] M. L. Ku, and H. J. Yeh, "An iterative ICI equalization and cancellation scheme for LTE SC-FDMA systems in multipath channels", in *Proceedings of the 12th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, pp. 610-615, 2012.
- [56] H.-L. Chao, C.-K. Chang, and C.-L. Liu, "A novel channel-aware frequency-domain scheduling in LTE UL", in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2013)*, pp. 917-922, 2013.

- [57] F. Z. Kaddour, M. Pischella, M. Philippe, E. Vivier, and L. Mrouch, “Opportunistic and efficient resource block allocation algorithms for LTE uplink networks”, in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2013)*, pp. 487-492, 2013.
- [58] A. Kanagasabai, and A. Nayak, “Opportunistic dual metric scheduling algorithm for LTE uplink”, in *IEEE Workshop on Smart Communication Protocols and Algorithms (SCPA 2015)*, pp. 1446-1415, 2015.
- [59] C. Wang, Y. P. Chung, K. C. Ting, C. C. Tseng, H. W. Wang, and F. C. Kuo, “Hybrid maximum-rate and proportional-fairness resource allocation in the downlink of the LTE networks”, in *IEEE International Conference Consumer Electronics-Taiwan (ICCE 2014)*, pp. 23-24, 2014.
- [60] C. Mehlfürer, J. C. Ikuno, M. Šimko, S. Schwarz, M. Wrulich, and M. Rupp, “The Vienna LTE simulators-enabling reproducibility in wireless communications research”, in *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2011, no. 1, 2011.
- [61] C. Mehlfürer, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska, and M. Rupp, “Simulating the Long Term Evolution physical layer”, in *IEEE 17th European Signal Processing Conference (2009)*, pp. 1471-1478, 2009.
- [62] M. Rupp, S. Schwarz, and M. Taranetz, “The Vienna LTE-Advanced simulators: up- and downlink, link and system level simulation”, in *SPRINGER BOOK Signals and Communication Technology*, pp. 1-357, 2016.
- [63] G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, F. Capozzi, and P. Camarda, “Simulating LTE cellular systems: an open-source framework”, in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no.2, pp. 498-513, 2011.
- [64] <https://www.nt.tuwien.ac.at/research/mobile-communications/vccs/vienna-lte-a-simulators/>.
- [65] K. Katsaros, “Introduction to NS-3”, 2013.
- [66] <https://www.nsnam.org/docs/release/3.14/models/html/lte-design.html>
- [67] N. Baldo, “The ns-3 LTE module by the LENA project”, 2011.

- [68] A. Viridis, G. Stea, and G. Nardini, “SimuLTE-A modular system-level simulator for LTE/LTE-A networks based on OMNet++”, in *IEEE Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications Conference (SIMULTECH 2014)*, pp. 1-12, 2014.
- [69] ETSI 136212 v.10.6.0, “LTE: evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); multiplexing and channel coding”, 2012.
- [70] K. Farooq, “LTE for 4g mobile broadband: Air interface technologies and performance”, Cambridge, UK, University Press, 2009.
- [71] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, and P. Beming, “3G evolution HSPA and LTE for mobile broadband”, Oxford, UK, Academic Press, 2008.
- [72] S. Rathi, N. Malik, N. Chahal, and S. Malik, “Throughput for TDD and FDD 4G LTE systems”, in *International Journal of Innovate and Exploring Engineering (IJITEE)*, vol. 3, pp. 2278-3075, 2014.
- [73] User equipment (UE) radio transmission and reception for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), 3GPP TS 36.101, v10.4.0, 2011.
- [74] V. Shivaldova, G. Maier, D. Smely, N. Czink, A. Paier, and C. F. Mecklenbräuer, “Performance analysis of vehicle-to-vehicle tunnel measurements at 5.9 GHz”, in *General Assembly and Scientific Symposium of International Union of Radio Science (URSI)*, pp. 1-4, 2011.
- [75] V. Shivaldova, A. Winkelbauer, and C. F. Mecklenbräuer, “Signal-to-noise modelling for vehicle-to-infrastructure communications”, in *Proceedings of the IEEE 6th International Symposium on Wireless Vehicular Communicationes (WiVeC2014)*, pp. 1-5, 2014.