

ANÁLISIS DE INTERFERENCIA EN LTE CON REUSO DE FRECUENCIA FRACCIONAL



**Betty Nayibe Fernández Campo
Lesly Alejandra González Camacho**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT
Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
Popayán
2014**

**ANÁLISIS DE INTERFERENCIA EN LTE CON REUSO DE FRECUENCIA
FRACCIONAL**



**Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Betty Nayibe Fernández Campo
Lesly Alejandra González Camacho**

Director: Claudia Milena Hernández Bonilla

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT
Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
Popayán
2014**



CONTENIDO

	pág.
1.INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN A LA INTERFERENCIA EN LTE Y LA TÉCNICA DE COORDINACIÓN REUSO DE FRECUENCIA FRACCIONAL (FFR)	1
1.2 MOTIVACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO.....	3
2. CONCEPTOS GENERALES.....	4
2.1 INTRODUCCIÓN.....	4
2.2 EVOLUCIÓN A LARGO TÉRMINO (LTE)	4
2.2.1 Arquitectura del Sistema LTE.....	5
2.2.2 Tecnologías de Nivel Físico	6
2.2.3 Canales Físicos de Enlace de Bajada (DL)	12
2.2.4 Factor de Reuso de Frecuencia (FRF, <i>Frequency Reuse</i> <i>Factor</i>).....	13
2.2.5 Planificadores LTE	15
2.3 CONTROL DE INTERFERENCIA INTER-CELDA (ICI).....	15
2.3.1 Interferencia Inter-Celda (ICI).....	16
2.3.2 Mitigación de Interferencia Inter-Celda (ICI).....	18
2.4 REUSO DE FRECUENCIA FRACCIONAL (FFR)	19
2.4.1 Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (<i>Strict FFR, Strict</i> <i>Fractional Frequency Reuse</i>).	22
2.4.2 Reuso de Frecuencia Fraccional Sectorizado (<i>Sectorized</i> <i>FFR, Sectorized Fractional Frequency Reuse</i>)	23



2.4.3	Reuso de Frecuencia Fraccional Suave (<i>Soft FFR, Soft Fractional Frequency Reuse</i>)	24
3.	METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO	25
3.1	PROCESO DE DESARROLLO DE UNA SIMULACIÓN.....	25
3.2	FASE 1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA.....	25
3.3	FASE 2 ANÁLISIS	26
3.4	FASE 3 FORMULACIÓN DEL MODELO	27
3.4.1	Diagrama de Flujo de la Técnica Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (<i>Strict FFR</i>)	30
3.5	FASE 4 SELECCIÓN DEL LENGUAJE.....	31
3.6	FASE 5 CODIFICACIÓN DEL MODELO.....	31
3.7	FASE 6 EXPERIMENTACIÓN.....	37
4.	RESULTADOS	38
4.1	MODELO DEL SISTEMA	38
4.2	CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN.....	41
4.3	CONFIGURACIÓN DE ESCENARIOS.....	43
4.4	EVALUACIÓN DE LAS CONFIGURACIONES DE FFR.....	52
4.5	EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD	60
4.6	EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL <i>THROUGHPUT</i> Y LA EFICIENCIA ESPECTRAL	73
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	80
5.1	CONCLUSIONES.....	80
5.2	TRABAJOS FUTUROS	82
	REFERENCIAS.....	83
	ANEXO A	85
A.1	ESTRUCTURA DEL SIMULADOR LTE DE VIENA.....	85
	ANEXO B	88
B.1	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA SINR -2 dB	88
B.2	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA SINR 5 dB	89
B.3	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA SINR 10 dB	91
B.4	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA SINR 22.5 dB	93



ANEXO C	96
C.1 DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN Y CURVAS DE FUNCIÓN DE PROBABILIDAD EMPÍRICA (ECDF) PARA PROPORTIONAL FAIR	96
C.1.1 Resultados para SINR -2 dB	96
C.1.2 Resultados para SINR 5 dB	98
C.1.3 Resultados para SINR 10 dB	101
C.1.4 Resultados para SINR 15 dB	104
C.1.5 Resultados para SINR 22.5 dB	106
C.2 DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN Y CURVAS DE FUNCIÓN DE PROBABILIDAD EMPÍRICA (ECDF) PARA ROUND ROBIN.....	109
C.2.1 Resultados para SINR -2 dB	109
C.2.2 Resultados para SINR 5 dB	112
C.2.3 Resultados para SINR 10 dB	115
C.2.4 Resultados para SINR 15 dB	117
C.2.5 Resultados para SINR 22.5 dB	120



LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 2.1 Arquitectura del Sistema LTE.....	5
Figura 2.2 Red de Acceso E-UTRAN e Interfaces.	6
Figura 2.3 Ejemplo del Espectro Correspondiente a 4 Subportadoras OFDM	7
Figura 2.4 Transmisión OFDM Basada en la Transformada Rápida Inversa de Fourier (IFFT).....	8
Figura 2.5. Recepción OFDM basada en la Transformada Rápida de Fourier (FFT).	8
Figura 2.6 Multiplexación de Usuarios en OFDMA.....	9
Figura 2.7 Estructura de LTE en el Dominio de la Frecuencia.	10
Figura 2.8 Concepto de Bloque de Recursos Físicos (PRB).....	11
Figura 2.9 Estructura LTE en el Dominio del Tiempo.....	12
Figura 2.10 Mapeo del canal en el enlace de bajada (DL)	13
Figura 2.11 Distribución de los grupos de canales con FRF igual a 1.....	14
Figura 2.12 Distribución de los grupos de canales con FRF igual a 3.....	14
Figura 2.13 Distribución de los grupos de canales con FRF igual a 7.....	15
Figura 2.14 Interferencia Inter-Celda (ICI)	17
Figura 2.15 Interferencia Experimentada por un Equipo de Usuario (UE) en el Límite de la Celda	20
Figura 2.16 Interferencia Experimentada por un Equipo de Usuario (UE) en el Centro de la Celda [9].	21
Figura 2.17 Ejemplo de Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (<i>Strict FFR</i>)	22
Figura 2.18 Ejemplo de Reuso de Frecuencia Fraccional Sectorizado (<i>Sectorized FFR</i>)	23
Figura 2.19 Ejemplo de Reuso de Frecuencia Fraccional Suave (<i>Soft FFR</i>)	24
Figura 3.1 Diagrama de Flujo de la Metodología Empleada para la Simulación.	25
Figura 3.2 Diagrama de Bloques del Sistema con Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR).	28
Figura 3.3 Diagrama de Flujo del Sistema con Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR).	29
Figura 3.4 Diagrama de Flujo de la Técnica Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (<i>Strict FFR</i>).....	30



Figura 3.5	Fragmento de código del archivo principal.....	32
Figura 3.6	Fragmento de código del archivo ejemplo.....	32
Figura 3.7	Fragmento de código del archivo parámetros.....	33
Figura 3.8	Fragmento de código del archivo parámetros adicionales.....	33
Figura 3.9	Fragmento de código del archivo configuración.....	34
Figura 3.10	Fragmento de código del archivo del planificador FFR.....	35
Figura 3.11	Fragmento de código del archivo procesos posteriores de FFR.....	36
Figura 3.12	Fragmento de código del archivo gráfico de FFR.....	36
Figura 4.1	Asignación de frecuencias en las celdas.....	38
Figura 4.2	Asignación de Ancho de Banda (BW) en las bandas de frecuencia empleadas.....	39
Figura 4.3	Umbrales de SINR para las zonas de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR).....	41
Figura 4.4	Separación de una celda con Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR), empleando reuso 1 y reuso 3, respectivamente.....	44
Figura 4.5	Distribución de usuarios en una red LTE con FFR.....	45
Figura 4.6	Separación de una celda mostrando la distribución de los usuarios en las zonas FR y PR.....	46
Figura 4.7	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 15$ dB y $\beta_{FR} = 1$	47
Figura 4.8	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 15$ dB y $\beta_{FR} = 0.75$	48
Figura 4.9	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 15$ dB y $\beta_{FR} = 0.5$	48
Figura 4.10	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 15$ dB y $\beta_{FR} = 0.25$	49
Figura 4.11	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 15$ dB y $\beta_{FR} = 0.01$	49
Figura 4.12	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = -2$ dB y $\beta_{FR} = 1$	50
Figura 4.13	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 22.5$ dB y $\beta_{FR} = 0.01$	51
Figura 4.14	Resultados de Simulación del <i>Throughput</i> Medio (Mbps) y Ganancia del <i>Throughput</i> Medio (%) para un Sistema LTE con FFR y <i>Proportional Fair</i>	53
Figura 4.15	Resultados de Simulación del <i>Throughput</i> Pico (Mbps) y Ganancia del <i>Throughput</i> Pico (%) para un Sistema LTE con FFR y <i>Proportional Fair</i>	54
Figura 4.16	Resultados de Simulación del <i>Throughput</i> Borde (Mbps) y Ganancia del <i>Throughput</i> Borde (%) para un Sistema LTE con FFR y <i>Proportional Fair</i>	55
Figura 4.17	Resultados de Simulación del <i>Throughput</i> Medio (Mbps) y Ganancia del <i>Throughput</i> Medio (%) para un Sistema LTE con FFR y <i>Round Robin</i>	57
Figura 4.18	Resultados de Simulación del <i>Throughput</i> Pico (Mbps) y Ganancia del <i>Throughput</i> Pico (%) para un Sistema LTE con FFR y <i>Round Robin</i>	58



Figura 4.19 Resultados de Simulación del <i>Throughput</i> Borde (Mbps) y Ganancia del <i>Throughput</i> Borde (%) para un Sistema LTE con FFR y <i>Round Robin</i>	59
Figura 4.20 ECDF.	60
Figura 4.21 Diagramas de Dispersión.	61
Figura 4.22 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=-2$ dB con $\beta_{FR}=1$	63
Figura 4.23 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=22.5$ dB con $\beta_{FR}=0.01$	64
Figura 4.24 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=10$ dB con $\beta_{FR}=0.5$	66
Figura 4.25 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=10$ dB con $\beta_{FR}=0.30$	67
Figura 4.26 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=10$ dB con $\beta_{FR}=0.25$	68
Figura 4.27 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=15$ dB con $\beta_{FR}=0.25$	69
Figura 4.28 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=10$ dB con $\beta_{FR}=0.25$	71
Figura 4.29 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=15$ dB con $\beta_{FR}=0.25$	72
Figura 4.30 Distribución normal del <i>Throughput</i> en cada escenario para <i>Proportional Fair</i>	74
Figura 4.31 Distribución normal de la eficiencia espectral en cada escenario para <i>Proportional Fair</i>	75
Figura 4.32 Distribución normal del <i>Throughput</i> en cada escenario para <i>Round Robin</i>	76
Figura 4.33 Distribución normal de la eficiencia espectral en cada escenario para <i>Round Robin</i>	77
Figura A.1 Diagrama Esquemático de Bloques del Simulador LTE a Nivel de Sistema.	86
Figura A.2 Diagrama Esquemático de Clases que Muestra la Implementación del Simulador LTE a Nivel de Sistema.	86
Figura B.1 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = -2$ dB y $\beta_{FR} = 0.75$	88
Figura B.2 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = -2$ dB y $\beta_{FR} = 0.5$	88
Figura B.3 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = -2$ dB y $\beta_{FR} = 0.25$	89
Figura B.4 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = -2$ dB y $\beta_{FR} = 0.01$	89
Figura B.5 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 5$ dB y $\beta_{FR} = 1$	90
Figura B.6 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 5$ dB y $\beta_{FR} = 0.75$	90



Figura B.7	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 5$ dB y $\beta_{FR} = 0.5$	90
Figura B.8	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 5$ dB y $\beta_{FR} = 0.25$	91
Figura B.9	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 5$ dB y $\beta_{FR} = 0.01$	91
Figura B.10	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 10$ dB y $\beta_{FR} = 1$	92
Figura B.11	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 10$ dB y $\beta_{FR} = 0.75$	92
Figura B.12	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 10$ dB y $\beta_{FR} = 0.5$	92
Figura B.13	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 10$ dB y $\beta_{FR} = 0.25$	93
Figura B.14	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 10$ dB y $\beta_{FR} = 0.01$	93
Figura B.15	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 22.5$ dB y $\beta_{FR} = 1$	94
Figura B.16	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 22.5$ dB y $\beta_{FR} = 0.75$	94
Figura B.17	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 22.5$ dB y $\beta_{FR} = 0.5$	94
Figura B.18	Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 22.5$ dB y $\beta_{FR} = 0.25$	95
Figura C.1	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = -2$ dB con $\beta_{FR} = 0.75$	96
Figura C.2	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = -2$ dB con $\beta_{FR} = 0.5$	97
Figura C.3	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = -2$ dB con $\beta_{FR} = 0.25$	97
Figura C.4	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = -2$ dB con $\beta_{FR} = 0.01$	98
Figura C.5	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = 5$ dB con $\beta_{FR} = 1$	99
Figura C.6	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = 5$ dB con $\beta_{FR} = 0.75$	99
Figura C.7	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = 5$ dB con $\beta_{FR} = 0.5$	100
Figura C.8	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = 5$ dB con $\beta_{FR} = 0.25$	100
Figura C.9	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = 5$ dB con $\beta_{FR} = 0.01$	101
Figura C.10	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = 10$ dB con $\beta_{FR} = 1$	102
Figura C.11	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = 10$ dB con $\beta_{FR} = 0.75$	102
Figura C.12	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = 10$ dB con $\beta_{FR} = 0.5$	103
Figura C.13	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = 10$ dB con $\beta_{FR} = 0.01$	103



Figura C.14	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 15$ dB con $\beta_{FR}=1$	104
Figura C.15	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 15$ dB con $\beta_{FR}=0.75$	105
Figura C.16	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 15$ dB con $\beta_{FR}=0.5$	105
Figura C.17	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 15$ dB con $\beta_{FR}=0.01$	106
Figura C.18	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 22.5$ dB con $\beta_{FR}=1$	107
Figura C.19	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 22.5$ dB con $\beta_{FR}=0.75$	107
Figura C.20	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 22.5$ dB con $\beta_{FR}=0.5$	108
Figura C.21	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 22.5$ dB con $\beta_{FR}=0.25$	108
Figura C.22	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= -2$ dB con $\beta_{FR}=1$	109
Figura C.23	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= -2$ dB con $\beta_{FR}=0.75$	110
Figura C.24	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= -2$ dB con $\beta_{FR}=0.5$	110
Figura C.25	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= -2$ dB con $\beta_{FR}=0.25$	111
Figura C.26	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= -2$ dB con $\beta_{FR}=0.01$	111
Figura C.27	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 5$ dB con $\beta_{FR}=1$	112
Figura C.28	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 5$ dB con $\beta_{FR}=0.75$	113
Figura C.29	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 5$ dB con $\beta_{FR}=0.5$	113
Figura C.30	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 5$ dB con $\beta_{FR}=0.25$	114
Figura C.31	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 5$ dB con $\beta_{FR}=0.01$	114
Figura C.32	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 10$ dB con $\beta_{FR}=1$	115



Figura C.33	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 10$ dB con $\beta_{FR}=0.75$	116
Figura C.34	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 10$ dB con $\beta_{FR}=0.5$	116
Figura C.35	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 10$ dB con $\beta_{FR}= 0.01$	117
Figura C.36	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 15$ dB con $\beta_{FR}= 1$	118
Figura C.37	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 15$ dB con $\beta_{FR}= 0.75$	118
Figura C.38	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 15$ dB con $\beta_{FR}= 0.5$	119
Figura C.39	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 15$ dB con $\beta_{FR}= 0.01$	119
Figura C.40	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 22.5$ dB con $\beta_{FR}= 1$	120
Figura C.41	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 22.5$ dB con $\beta_{FR}= 0.75$	121
Figura C.42	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 22.5$ dB con $\beta_{FR}= 0.5$	121
Figura C.43	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 22.5$ dB con $\beta_{FR}= 0.25$	122
Figura C.44	ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 22.5$ dB con $\beta_{FR}= 0.01$	122



LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 2.1 Número de Bloques de Recursos Físicos (PRB) y Anchos de Banda (BW) en Función de la Canalización.	11
Tabla 4.1 Parámetros de simulación empleados para las simulaciones de FFR en LTE.....	42
Tabla 4.2 Escenarios de simulación de FFR.....	43
Tabla 4.3 Escenarios de Prueba para Análisis de Capacidad.....	61
Tabla 4.4 Escenarios de prueba más representativos.	73
Tabla 4.5 Valores de media y desviación estandar del <i>Throughput</i> para cada escenario con <i>Proportional Fair</i>	74
Tabla 4.6 Valores de media y desviación estandar de la eficiencia espectral para cada escenario con <i>Proportional Fair</i>	75
Tabla 4.7 Valores de media y desviación estandar del <i>Throughput</i> para cada escenario con <i>Round Robin</i>	76
Tabla 4.8 Valores de media y desviación estandar de la eficiencia espectral para cada escenario con <i>Round Robin</i>	77



LISTA DE ACRÓNIMOS

1G	Primera Generación (<i>1st Generation</i>)
2G	Segunda Generación (<i>2nd Generation</i>)
3G	Tercera Generación (<i>3rd Generation</i>)
4G	Cuarta Generación (<i>4th Generation</i>)
ACK	Acuse de Recibo (<i>Acknowledgement</i>)
AWGN	Ruido Blanco Auditivo Gaussiano (<i>Additive White Gaussian Noise</i>)
BLER	Tasa de Error de Bloque (<i>Block Error Rate</i>)
BS	Estación Base (<i>Base Station</i>)
BW	Ancho de Banda (<i>Band-Width</i>)
CCI	Interferencia Co-Canal (<i>Co-Channel Interference</i>)
CP	Prefijo Cíclico (<i>Cyclic Prefix</i>)
CQI	Indicador de la Calidad del Canal (<i>Channel Quality Indicator</i>)
DCI	Información de Control en el Enlace de Bajada (<i>Downlink Control Information</i>)
DL	Enlace de Bajada (<i>DownLink</i>)
eNB	Nodo B Evolucionado (<i>Evolved Node B</i>)



EPC	Red Troncal (<i>Evolved Packet Core</i>)
EPS	Sistema de Paquetes Evolucionado (<i>Evolved Packet System</i>)
E-UTRAN	Red de Acceso Radio Terrestre Universal Evolucionada (<i>Evolved-Universal Terrestrial Radio Access Network</i>)
Extended CP	Prefijo Cíclico Largo (<i>Extended Cyclic Prefix</i>)
FD	Comunicación Bidireccional (<i>Full Duplex</i>)
FDD	Duplexación por División de Frecuencia (<i>Frequency Division Duplexing</i>)
FFR	Reuso de Frecuencia Fraccional (<i>Fractional Frequency Reuse</i>)
FFR-3	Reuso de Frecuencia Fraccional-3 (<i>Fractional Frequency Reuse-3</i>)
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
FRF	Factor de Reuso de Frecuencia (<i>Frequency Reuse Factor</i>)
HARQ	ARQ Híbrido (<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>)
ICaI	Interferencia Interportadora (<i>Inter-Carrier Interference</i>)
ICI	Interferencia Inter-Celda (<i>Inter-Cell Interference</i>)
ICIC	Coordinación Interferencia Inter-Celda (<i>Inter-Cell Interference Coordination</i>)
IFFT	Transformada Rápida Inversa de Fourier (<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>)
InCI	Interferencia Intra-Celda (<i>Intra-Cell Interference</i>)



IP	Protocolo de Internet (<i>Internet Protocol</i>)
ISI	Interferencia Intersimbólica (<i>Inter-Symbol Interference</i>)
LTE	Evolución a Largo Término (<i>Long Term Evolution</i>)
MCS	Esquema de Modulación y Codificación (<i>Modulation and Coding Scheme</i>)
MIESM	Métrica de Información Mutua de la SINR Efectiva (<i>Mutual Information Effective SINR Metric</i>)
MIMO	Múltiple Entrada Múltiple Salida (<i>Multiple Input Multiple Output</i>)
NACK	Acuse de Recibo Negativo (<i>Negative Acknowledgement</i>)
Normal CP	Prefijo Cíclico Normal (<i>Normal Cyclic Prefix</i>)
OFDM	Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>)
OFDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>)
PDCCH	Canal Físico de Control de Enlace de Bajada (<i>Physical Downlink Control Channel</i>)
PedA	Canal Peatonal A (<i>Pedestrian A Channel</i>)
PedB	Canal Peatonal B (<i>Pedestrian B Channel</i>)
PHY	Nivel Físico (<i>Physical Layer</i>)
PMI	Indicador de Matriz de Precodificación (<i>Precoding Matrix Indicator</i>)
PRB	Bloque de Recurso Físico (<i>Physical Resource Block</i>)



PSD	Densidad Espectral de Potencia (<i>Power Spectral Density</i>)
PUSCH	Canal Físico Compartido de Enlace de Subida (<i>Physical Uplink Shared Channel</i>)
QoS	Calidad de Servicio (<i>Quality of Service</i>)
RI	Indicación de Rango (<i>Rank Indication</i>)
Sectorized FFR	Reuso de Frecuencia Fraccional Sectorizado (<i>Sectorized Fractional Frequency Reuse</i>)
SC-FDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencia con Portadora Única (<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>)
SINR	Relación Señal a Ruido más Interferencia (<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i>)
SISO	Única Entrada Única Salida (<i>Single Input and Single Output</i>)
Strict FFR	Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (<i>Strict Fractional Frequency Reuse</i>)
Soft FFR	Reuso de Frecuencia Fraccional Suave (<i>Soft Fractional Frequency Reuse</i>)
TB	Bloque de Transporte (<i>Transport Block</i>)
TS	Ranura Temporal (<i>Time Slot</i>)
UE	Equipo de Usuario (<i>User Equipment</i>)
UL	Enlace de Subida (<i>UpLink</i>)
VehA	Canal Vehicular A (<i>Vehicular A Channel</i>)
VehB	Canal Vehicular B (<i>Vehicular B Channel</i>)



1.INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN A LA INTERFERENCIA EN LTE Y LA TÉCNICA DE COORDINACIÓN REUSO DE FRECUENCIA FRACCIONAL (FFR)

El estándar de telefonía móvil Evolución a Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*) es capaz de ofrecer mayores velocidades de transmisión de datos y prestar múltiples servicios, debido a que emplea la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia con Portadora Única (SC-FDMA, *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) para el Enlace de Subida (UL, *UpLink*) y la técnica de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para el Enlace de Bajada (DL, *DownLink*) [1], lo cual le permite reducir el efecto de la Interferencia Intersimbólica (ISI, *Inter-Symbol Interference*) y de la Interferencia Interportadora (ICAI, *Inter-Carrier Interference*) dentro de la celda. No obstante la Interferencia Co-Canal (CCI, *Co-Channel Interference*) o Interferencia Inter-Celda (ICI, *Inter-Cell Interference*) está presente dentro de la red, ya que al emplearse un factor de reuso de frecuencia igual a 1 [2], los usuarios del límite de la celda se ven gravemente afectados [3].

Para mantener la Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) del sistema es necesario emplear una adecuada técnica de Coordinación de Interferencia Inter-Celda (ICIC, *Inter-Cell Interference Coordination*), que permita hacer uso eficiente de los recursos radio y mitigar dicha interferencia, tal como hace la técnica de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR, *Fractional Frequency Reuse*) que se basa en un esquema de reutilización n ($n > 1$) [4], donde la celda se divide en 2 regiones, una interior cercana a la Estación Base (BS, *Base Station*) y otra exterior situada en el borde de la celda; el Ancho de Banda (BW, *BandWidth*) se divide en 2 sub-bandas, donde la sub-banda de la región interior emplea un factor de reuso 1 y la sub-banda del exterior de la celda emplea un factor de reuso 3; de esta forma, la Interferencia Intra-Celda (InCI, *Intra-Cell Interference*) se mitiga y la Interferencia Inter-Celda (ICI) se reduce sustancialmente [5], al mismo tiempo logra que los usuarios del límite de la celda reciban una señal con calidad aceptable que reduzca la probabilidad de interrupción del servicio [6].

Esta técnica busca un equilibrio entre la eficiencia espectral y la mitigación de interferencia [7], además de garantizar un despliegue más flexible y escalable que



beneficie tanto a los operadores como a los usuarios finales, ya que aumenta la capacidad de la celda y mejora el desempeño del sistema.

En este documento se realiza un estudio de las características y el funcionamiento de la técnica de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR), con el propósito de analizar su desempeño a nivel de sistema e identificar cual es la configuración más apropiada de esta técnica. Dicho análisis se realiza variando las dimensiones de la región interior y exterior de las celdas y la cantidad de Ancho de Banda (BW) empleado en cada zona. Para evaluar la capacidad se analiza el *Throughput* y la eficiencia espectral, producidos durante la transmisión de datos para cada configuración específica, de otra forma la interferencia es analizada a través de la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*) alcanzada por cada usuario en la zona borde y centro, no obstante también se analizan todos los escenarios posibles identificando si existe mejora o no al emplear la técnica de coordinación.

1.2 MOTIVACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

El Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) con el fin de ampliar la cobertura de Internet y teniendo en cuenta que en Colombia el tráfico inalámbrico de datos creció a gran escala en los últimos años, subastó diferentes bandas de frecuencia del espectro electromagnético a los operadores móviles para migrar a nuevas tecnologías inalámbricas que brindarán mejores servicios de red a los usuarios. Es por esto que al país llegó la tecnología LTE como alternativa a dicha necesidad.

Sin embargo, los sistemas LTE presentan Interferencia Inter- Celda (ICI) que provoca grandes variaciones en la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) y baja velocidad de transmisión de datos, principalmente a los Equipos de Usuarios (UE, *User Equipment*) ubicados en el borde de la celda, limitando el óptimo desempeño del sistema [6].

Teniendo en cuenta lo anterior, para este trabajo de grado es de gran interés determinar bajo qué parámetros la técnica de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) mitiga la interferencia y mejora la capacidad del sistema LTE, principalmente en la zona límite de celda.



1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Analizar a nivel de sistema la interferencia en LTE en el Enlace de Bajada (DL) con Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (*Strict FFR*), como mecanismo de gestión de interferencia.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Modelar y aplicar la técnica Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (*Strict FFR*) como mecanismo de gestión de interferencia en un sistema LTE.
- Evaluar la interferencia y la capacidad de un sistema LTE que emplea Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (*Strict FFR*).

1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO

El trabajo de grado está organizado de la siguiente manera:

En el capítulo 2 se describen las características principales de la tecnología LTE como su arquitectura, los fundamentos de OFDM y los canales físicos del Enlace de Bajada (DL) importantes en el desarrollo de este trabajo. Además, se explica la Interferencia Inter-Celda (ICI), la importancia de mitigarla y se propone a la técnica de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) como mecanismo de gestión de interferencia.

En el capítulo 3 se explica la metodología de desarrollo empleada para la realización de este trabajo de grado, donde se plantea el diseño del modelo con los diagramas de flujo, la codificación y la experimentación del sistema.

En el capítulo 4 se desarrolla la experimentación del sistema. Se muestran los resultados obtenidos empleando la técnica de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) como mecanismo de gestión de interferencia y posteriormente se realiza el análisis de dichos resultados.

En el capítulo 5 se encuentran las conclusiones del presente trabajo de grado y las líneas futuras a seguir en el estudio de la tecnología LTE y de la técnica de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR).



2. CONCEPTOS GENERALES

2.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el área de mayor crecimiento dentro del sector de las telecomunicaciones es la de las comunicaciones móviles [8], destacándose particularmente la industria de la telefonía móvil celular la cual se ha incrementado en más de cuatro mil millones de suscriptores a nivel mundial [9]. Desde hace varios años las compañías y organizaciones internacionales de telecomunicaciones han visto la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías que permitan atender a la creciente población de usuarios, que no solo aumenta en número sino también en demanda de servicios [8].

Los primeros sistemas desarrollados o sistemas de Primera Generación (1G, *1st Generation*) fueron los sistemas celulares analógicos que soportaban comunicación de voz con *roaming* limitado, la Segunda Generación (2G, *2nd Generation*) llamada sistemas digitales, se caracterizaron por tener mayor capacidad y una mejor calidad de voz, la Tercera Generación (3G, *3rd Generation*), soportaba transmisiones de datos limitadas con movilidad garantizada [9], en versiones siguientes a estas generaciones surgieron los sistemas de Cuarta Generación (4G, *4th Generation*) que introdujeron mayores velocidades de transmisión y soporte de todos los servicios a través del Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*), esta evolución fue denominada Evolución a Largo Término (LTE) [8] y es una de las tecnologías de acceso dominante en los estándares de telefonía móvil actuales [9].

2.2 EVOLUCIÓN A LARGO TÉRMINO (LTE)

LTE es una tecnología de redes móviles desarrollada por el Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (3GPP, *3rd Generation Partnership Project*) y tiene como objetivo mejorar los servicios de comunicaciones móviles. Entre las principales características de LTE cabe mencionar:

- Está basado en conmutación de paquetes [8].
- Emplea las técnicas de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) para el

Enlace de Bajada (DL) y Acceso Múltiple por División de Frecuencia con Portadora Única (SC-FDMA) para el Enlace de Subida (UL) [9].

- Opera tanto en bandas pareadas (Duplexación por División de Frecuencia (FDD, *Frequency-Division Duplexing*)) como en no pareadas (Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time-Division Duplexing*)) [10].
- Ancho de Banda (BW) escalable entre los valores 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20MHz [10].
- Velocidades de transmisión pico superiores a 100 Mbps y 50 Mbps en el Enlace de Bajada (DL) y Enlace de Subida (UL) respectivamente (con modulaciones de alta eficiencia y configuración de antenas Múltiple Entrada Múltiple Salida (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*)) [10].
- Mejor calidad de servicio a través de la reducción del tiempo de latencia, tanto en el plano de usuario como de control [8].
- Mejora la eficiencia espectral con respecto a los sistemas anteriores en un orden de 3 aproximadamente, llegando a valores pico de 5 bps/Hz (a velocidades de 100 Mbps sobre una canalización de 20 MHz) [8].
- Nueva arquitectura de la red troncal, mucho más simplificada [8].
- Red basada completamente en IP, compatible con sistemas de comunicaciones móviles previos [10].

2.2.1 Arquitectura del Sistema LTE

La arquitectura del sistema LTE, denominada formalmente como Sistema de Paquetes Evolucionado (EPS, *Evolved Packet System*), se puede observar en la figura 2.1 y está conformada por tres componentes básicos: Equipo de Usuario (UE), Red de Acceso (E-UTRAN, *Evolved - Universal Terrestrial Radio. Access Network*) y Red Troncal (EPC, *Evolved Packet Core*) [8].

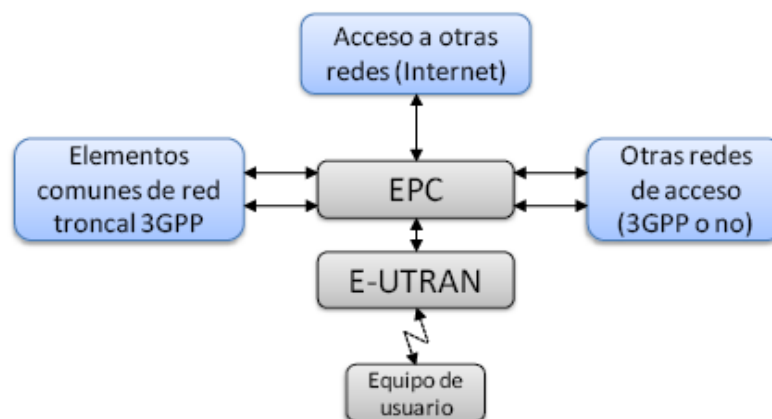


Figura 2.1 Arquitectura del Sistema LTE.

El Equipo de Usuario (UE) es el dispositivo empleado por el usuario para acceder a los servicios de la red. La conexión entre el Equipo de Usuario (UE) y la Red de Acceso (E-UTRAN) se realiza a través de una interfaz radio [8].

La Red de Acceso (E-UTRAN) y la Red Troncal (EPC) en conjunto, son las encargadas de proporcionar servicios de transferencia de paquetes IP entre los Equipos de Usuarios (UE) y redes externas como Internet, entre otras [8].

En la figura 2.2 se puede observar la arquitectura e interfaces de la Red de Acceso (E-UTRAN), la cual está compuesta únicamente por la Estación Base (BS) denominada Nodo B Evolucionado (eNB, *Evolved Node B*), encargada de proporcionar la conectividad entre los Equipos de Usuarios (UE) y la Red Troncal (EPC). Además tiene tres interfaces de nombre E-UTRAN Uu, S1 y X2 que le permiten comunicarse con el resto de elementos del sistema [8].

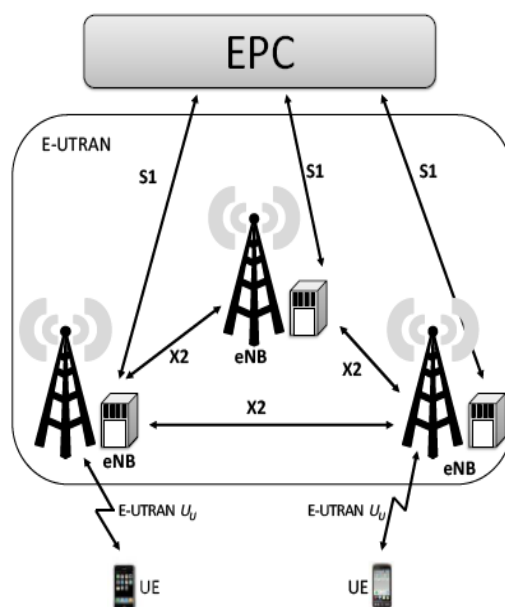


Figura 2.2 Red de Acceso E-UTRAN e Interfaces.

2.2.2 Tecnologías de Nivel Físico

LTE utiliza las técnicas OFDMA y SC-FDMA para los enlaces Bajada (DL) y Subida (UL) respectivamente, basadas en la técnica de transmisión Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) [8].

2.2.2.1 Fundamentos de OFDM

OFDM constituye un mecanismo de transmisión multi-portadora que consiste en multiplexar un conjunto de símbolos sobre un conjunto de subportadoras ortogonales entre sí. Gracias a las propiedades de ortogonalidad de dichas subportadoras, es posible efectuar la transmisión simultánea de todos los símbolos manteniendo la capacidad de separación de los mismos en recepción [10].

En la figura 2.3 se muestra un ejemplo de los espectros correspondientes a un conjunto de 4 subportadoras OFDM, donde se observa que en cada máximo de una señal existe únicamente una contribución espectral de una subportadora mientras que el resto presentan nulos [10].

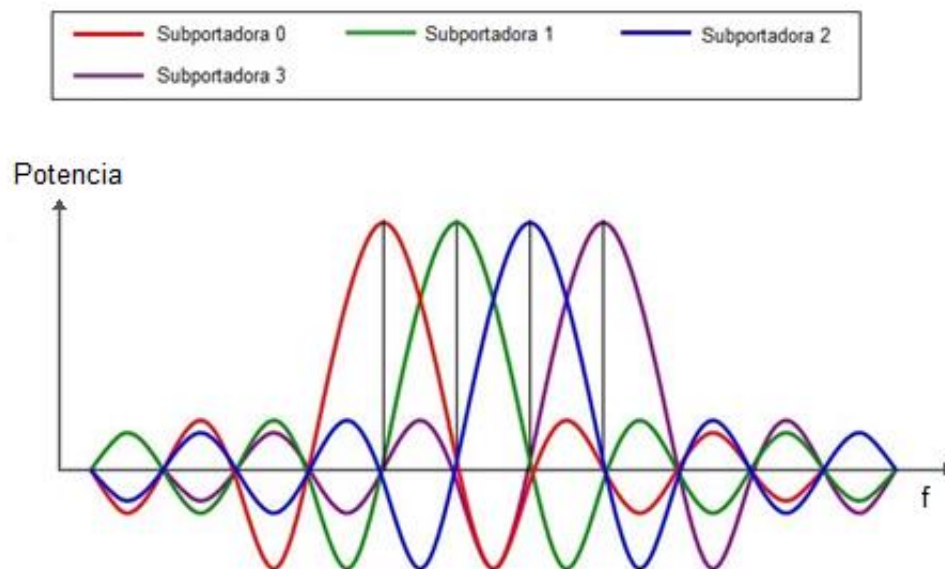


Figura 2.3 Ejemplo del Espectro Correspondiente a 4 Subportadoras OFDM [10].

- **Esquemas de transmisión y recepción OFDM**

Para generar una señal OFDM se consideran los K símbolos complejos a transmitir como los valores de las muestras en frecuencia de la señal resultante (a razón de una muestra por subportadora), luego dichos símbolos se convierten de símbolos seriales a bloques de datos paralelos y se calcula la Transformada Rápida Inversa de Fourier (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*) de N muestras. Este proceso proporciona las muestras temporales de la señal que pasan por un



convertor paralelo a serie y enseguida a un convertor digital/analógico (D/A) para generar la señal analógica a transmitir, tal y como se muestra en la figura 2.4 [10].

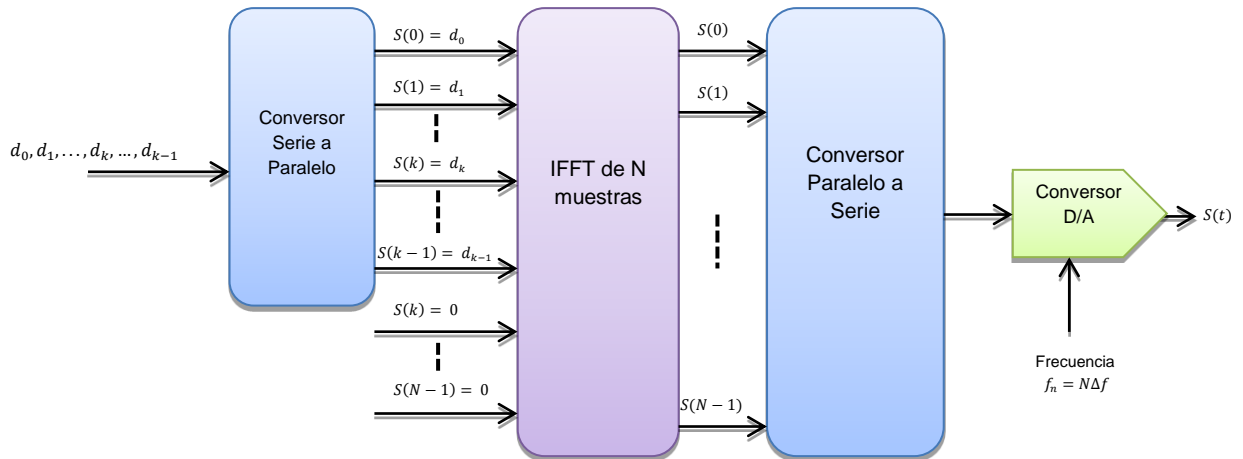


Figura 2.4 Transmisión OFDM Basada en la Transformada Rápida Inversa de Fourier (IFFT).

El proceso de recepción se muestra en la figura 2.5. Tras convertir la señal analógica a digital y posteriormente pasarla por el convertor serie a paralelo, se efectúa la Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*), de las N muestras resultantes a la salida, las K primeras constituyen los símbolos que se desean recuperar mientras que las restantes, hasta completar las N muestras, son descartadas, ya que corresponden a los N-K ceros que son añadidos en el transmisor para realizar la IFFT [10].

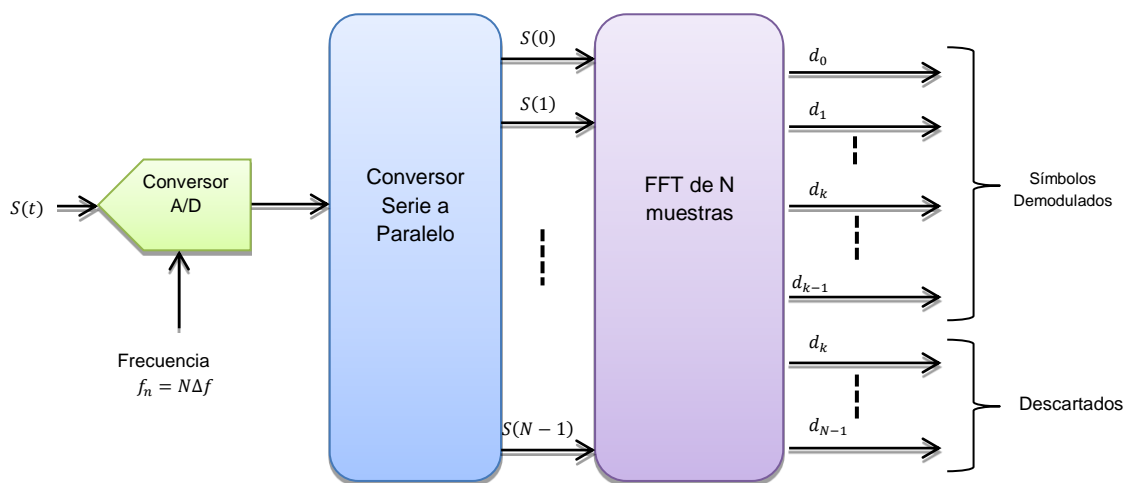


Figura 2.5. Recepción OFDM basada en la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

2.2.2.2 OFDMA como técnica de acceso múltiple para el Enlace de Bajada (DL)

De la transmisión OFDM presentada anteriormente, surge la técnica OFDMA, utilizada en el Enlace de Bajada (DL) de LTE, donde los símbolos modulados sobre las subportadoras pueden pertenecer a usuarios distintos. De esta forma, es posible acomodar varias transmisiones simultáneas correspondientes a diferentes usuarios sobre subportadoras distintas, tal y como se muestra en la figura 2.6, así mismo, en el receptor de cada usuario solo es necesario recuperar el contenido de las subportadoras asignadas a cada terminal para separar la información de cada uno [10].

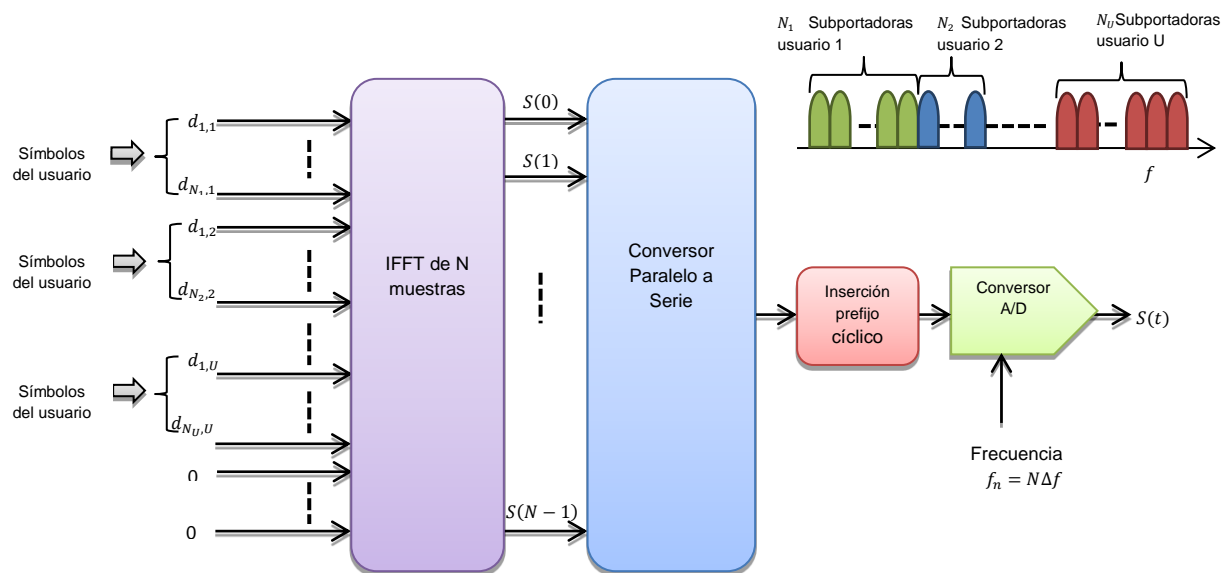


Figura 2.6 Multiplexación de Usuarios en OFDMA.

2.2.2.3 Parámetros de OFDMA empleados por LTE

Para el Enlace de Bajada (DL) del sistema LTE la separación definida entre subportadoras es de 15 kHz, o de 7.5 kHz, particularmente para el caso de transmisión *multicast* en Redes Iso-Frecuencia (SFN, *Single Frequency Network*) [10].

Las subportadoras se agrupan en bloques de 12 subportadoras consecutivas, con un Ancho de Banda (BW) resultante de 180 kHz, constituyendo un Bloque de Recursos Físicos (PRB, *Physical Resource Block*), que equivale a la unidad

mínima de asignación de recursos a un usuario, como se muestra en la figura 2.7 [10].

Cada Bloque de Recursos Físicos (PRB) transmite 6 o 7 símbolos OFDMA, dependiendo de la longitud de Prefijo Cíclico (CP, *Cyclic Prefix*), utilizado. En el dominio del tiempo un Bloque de Recursos Físicos (PRB) dura 0.5 ms, que equivale a la duración de una Ranura Temporal (TS, *Time Slots*) de una trama LTE. El número total de subportadoras ocupadas por una portadora LTE en el Enlace de Bajada (DL) es de $N_S = 12N_{PRB} + 1$, siendo N_{PRB} el número de Bloques de Recursos Físicos (PRB) utilizados y el 1 la representación de la subportadora central (o DC) empleada para facilitar los mecanismos de ajuste y sincronización en frecuencia del receptor [10].

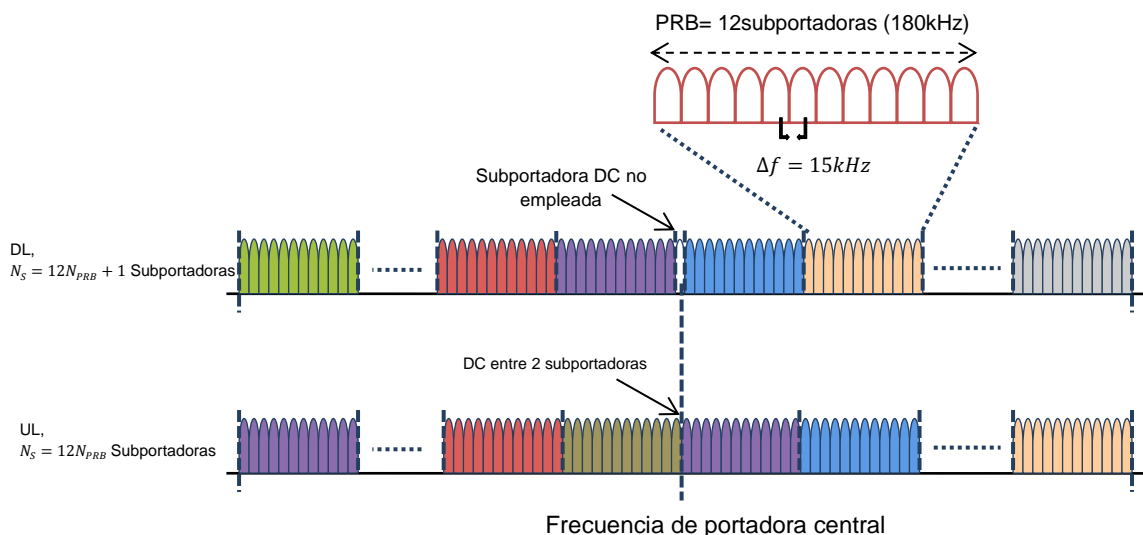


Figura 2.7 Estructura de LTE en el Dominio de la Frecuencia.

Una representación gráfica de un Bloque de Recursos Físicos (PRB) en una señal OFDMA se puede observar en la figura 2.8. Cada color representa a un usuario y la asignación de Bloques de Recursos Físicos (PRB) es variable con el tiempo.

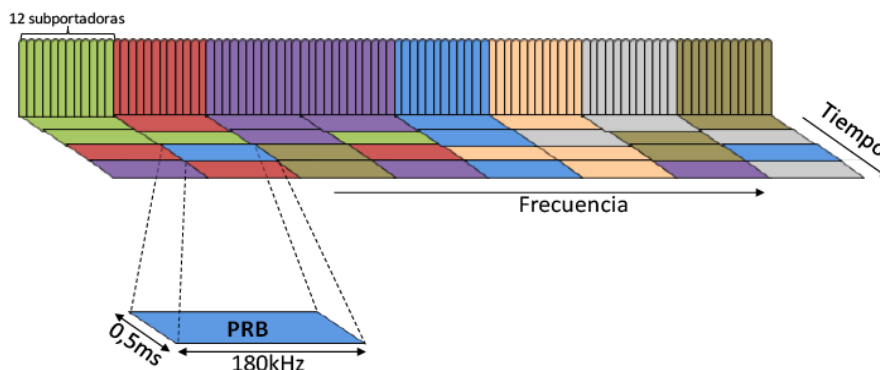


Figura 2.8 Concepto de Bloque de Recursos Físicos (PRB).

El número de Bloques de Recursos Físicos (PRB) disponibles en el sistema y los Anchos de Banda (BW) de transmisión dependen de la canalización, tal como se indica en la tabla 2.1 [10]:

Canalización	1,4MHz	3MHz	5MHz	10MHz	15MHz	20MHz
Número de PRB	6	15	25	50	75	100
BW (MHz)	1.095	2.715	4.515	9.015	13.515	18.015

Tabla 2.1 Número de Bloques de Recursos Físicos (PRB) y Anchos de Banda (BW) en Función de la Canalización.

A continuación se presenta la estructura temporal de la trama para un sistema LTE, aunque existen diferentes opciones de trama, solo se describe la correspondiente al modo de Duplexación por División de Frecuencia (FDD) tipo 1 sobre la cual se fundamenta el trabajo de grado.

- **Estructura de trama tipo 1**

La estructura de trama tipo 1 que se observa en la figura 2.9, es válida para sistemas que utilizan Duplexación por División de Frecuencia (FDD) y se aplica tanto al Enlace Bajada (DL) como al Enlace de Subida (UL), soporta Comunicación Semi-Bidireccional (HF, *Half Duplex*) y Comunicación Bidireccional (FD, *Full Duplex*).

La estructura del eje temporal se divide en tramas de 10 ms, donde cada trama está compuesta por 20 Ranuras Temporales (TS) de duración 0,5 ms, de esta forma se define una unidad básica de recursos, formada por dos Ranuras Temporales (TS) denominada subtrama de duración 1 ms, donde en cada Ranura Temporal (TS) se transmiten 6 o 7 símbolos OFDM de duración 66,7µs.

En el caso de utilizar 7 símbolos, el Prefijo Cíclico (CP), tiene una duración de $4,7\mu s$, a excepción del primer símbolo en el que tiene una duración de $5,2\mu s$ y se le denomina Prefijo Cíclico Normal (*Normal CP, Normal Cyclic Prefix*). Por otra parte para el caso en que se utilizan 6 símbolos por Ranura Temporal (TS) el Prefijo Cíclico (CP) tiene una duración de $16,67\mu s$ y se denomina Prefijo Cíclico Extendido (*Extended CP, Extended Cyclic Prefix*) [10].

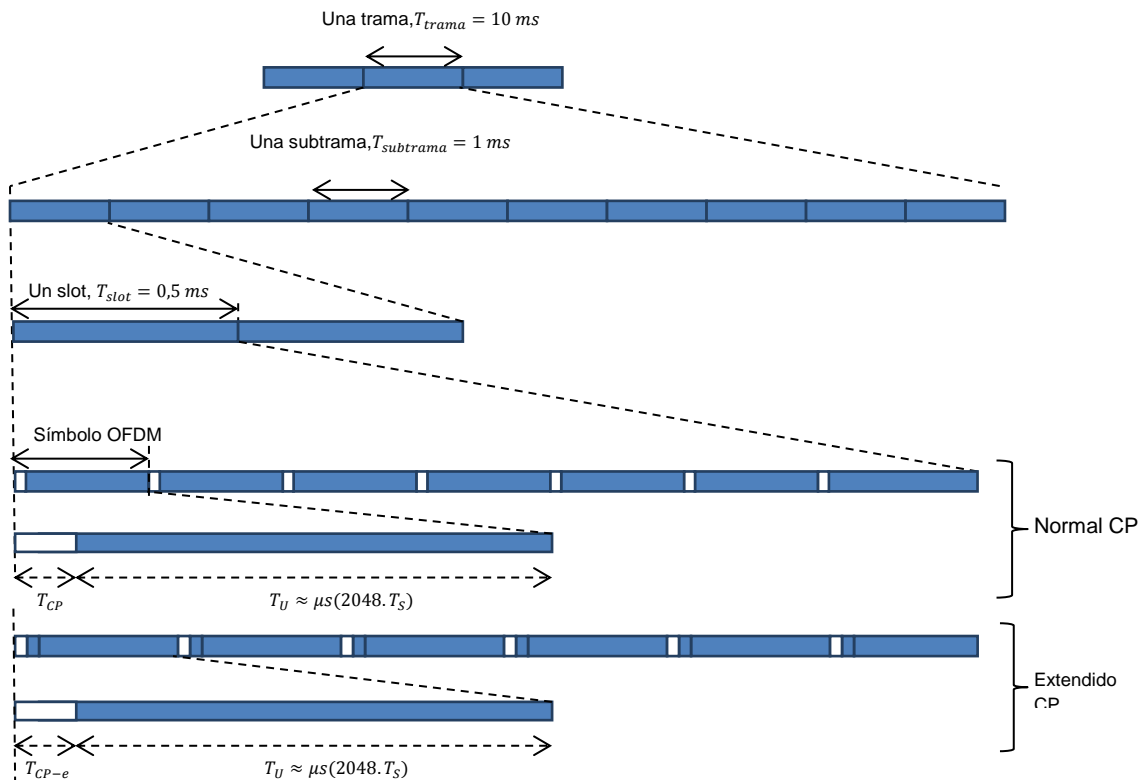


Figura 2.9 Estructura LTE en el Dominio del Tiempo.

2.2.3 Canales Físicos de Enlace de Bajada (DL)

Dentro de la interfaz radio de LTE se encuentran los canales físicos de Enlace de Bajada (DL), los cuales son un conjunto de recursos de tiempo y frecuencia empleados para la transmisión de un canal de transporte en particular, como se observa en la Figura 2.10. Los canales físicos sin asignación de canales de transporte, se emplean como canales de control para enviar Información de Control de Enlace de Bajada (DCI, *Downlink Control Information*) al terminal móvil, para la correcta recepción y decodificación de los datos transmitidos. Los canales de control también suministran al Enlace de Subida (UL) información que se entrega al planificador y al protocolo ARQ Híbrido (HARQ, *Híbrido Automatic Repeat Request*), acerca del estado en el terminal móvil [11].

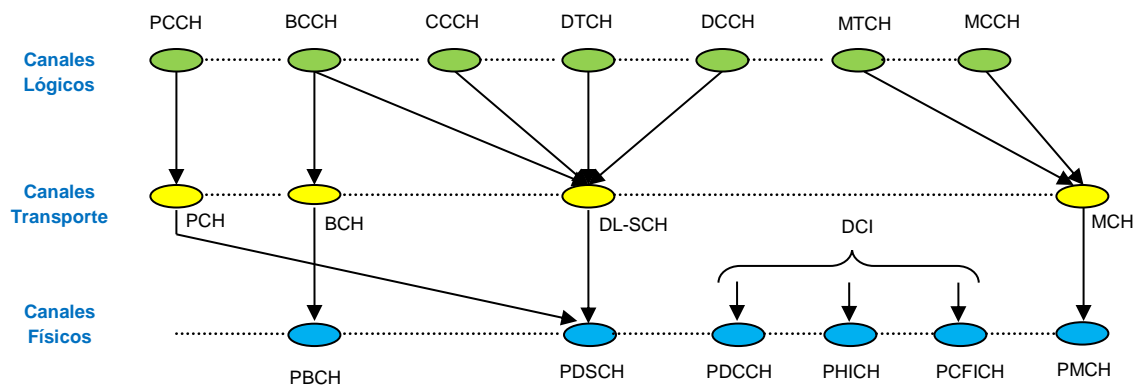


Figura 2.10 Mapeo del canal en el enlace de bajada (DL) [9].

A continuación se describen los canales físicos del Enlace de Bajada (DL) relevantes para el desarrollo de este trabajo [11]:

- **Canal Físico Compartido de Enlace de Bajada (PDSCH, *Physical Downlink Shared Channel*):** es el principal canal físico utilizado para la transmisión de datos de unidifusión, actúa en la transmisión de información de paginación y radiodifusión. Solo se asigna al usuario cuando tenga algo que recibir de acuerdo a las decisiones del planificador [11].
- **Canal Físico de Control de Enlace de Bajada (PDCCH, *Physical Downlink Control Channel*):** se encarga de enviar Información de Control en el Enlace de Bajada (DCI, *Downlink Control Information*) para que los Bloques de Recursos Físicos (PBR) sean asignados de forma dinámica. De su configuración depende la cantidad de símbolos que pueden ocupar los datos del Canal Físico Compartido de Enlace de Bajada (PDSCH) [11].

La Información de Control en el Enlace de Bajada (DCI) varía en su tamaño al tener diferentes tipos de información de control, su dimensión depende tanto de la configuración global de la celda, como del Ancho de Banda (BW) y el número de señales de referencia.

2.2.4 Factor de Reuso de Frecuencia (FRF, *Frequency Reuse Factor*)

El reuso de frecuencia permite reutilizar canales de frecuencia y garantizar el mínimo nivel de interferencia. Lo anterior se hace dividiendo el conjunto de subportadoras en F grupos (siendo F el Factor de Reuso de Frecuencia (FRF)),



donde cada grupo se asigna a una celda diferente de un conjunto de F celdas denominado *Cluster*.

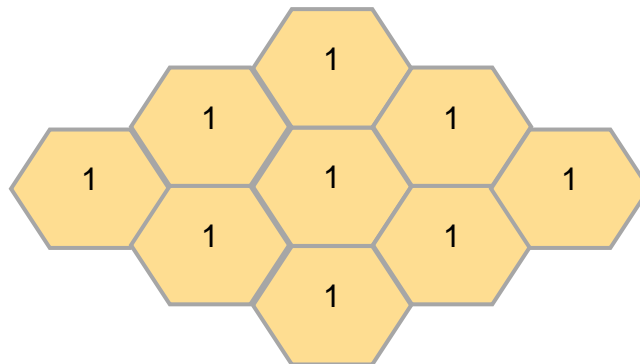


Figura 2.11 Distribución de los grupos de canales con FRF igual a 1.

Un Factor de Reuso de Frecuencia (FRF) igual a 1 ($F = 1$) significa que todas las celdas usan las mismas frecuencias (ver Figura 2.11), lo cual aumenta la Interferencia Inter- Celda (ICI). Si se emplea un Factor de Reuso (FRF) igual a 3 ($F = 3$) (ver Figura 2.12), la cantidad total de canales disponibles se divide entre 3, el resultado será el número de canales asignados a cada celda.

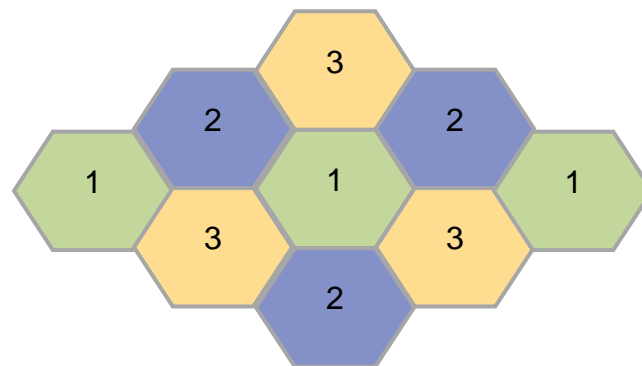


Figura 2.12 Distribución de los grupos de canales con FRF igual a 3.

En general, al tener un factor de reuso N , se forma un *Cluster* con N celdas, cada una teniendo un grupo de canales, donde a medida que se emplee un factor de reuso mayor, la separación entre celdas co-canal aumenta, lo cual, disminuye la interferencia pero afecta la capacidad de la celda, por lo que se debe tener un mayor espectro para mantener la capacidad dada (ver Figura 2.13).

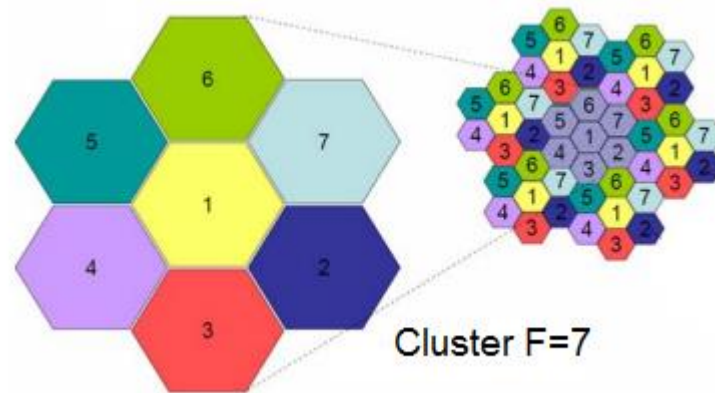


Figura 2.13 Distribución de los grupos de canales con FRF igual a 7.

2.2.5 Planificadores LTE

Round Robin: Esta estrategia asigna cíclicamente el canal a los usuarios sin considerar las condiciones del canal radio. Por lo tanto, es una estrategia justa en el sentido de que cada usuario tiene asignado el canal durante el mismo tiempo. Sin embargo, al no considerar las condiciones del canal, no está adaptado a las necesidades de los usuarios, donde, aquellos con peor condición del canal radio requerirán más tiempo el canal para igualar su calidad de servicio a la de los usuarios con las mejores condiciones radio.

Proportional Fair: es un algoritmo de planificación basado en el estado del canal radio, que explota la diversidad de usuario, repartiendo los recursos de manera justa entre estos, que permite que los usuarios con peores condiciones de canal tengan mayores recursos para transmitir.

2.3 CONTROL DE INTERFERENCIA INTER-CELDA (ICI)

El sistema LTE al tener altos requerimientos de velocidades pico y eficiencia espectral, se despliega con un Factor de Reuso de Frecuencia (FRF) de uno, donde todos los Bloques de Recursos (PRB) están disponibles en todos los Nodos B Evolucionados (eNB), para maximizar la capacidad potencial por celda [10].

Con este despliegue los mismos recursos tiempo-frecuencia pueden ser utilizados en las celdas vecinas, lo cual genera Interferencia Inter-Celda (ICI), que afecta las transmisiones entre los usuarios atendidos por diferentes celdas [10].



Las funciones del planificador al garantizar que dentro de una celda un Bloque de Recurso Físico (PRB) sea asignado solo a las transmisiones de un único usuario en cada subtrama, aseguran que el sistema celular no presente Interferencia Intra-Celda (InCI)¹, ya que evita las colisiones entre las transmisiones de múltiples usuarios al acceder al canal compartido (Canal Físico Compartido de Enlace de Bajada (PDSCH) o Canal Físico Compartido de Enlace de Subida (PUSCH)). No obstante, la Interferencia Inter-Celda (ICI) se genera principalmente entre celdas adyacentes, porque el mismo Bloque de Recurso (PRB) se puede asignar en la misma subtrama a las transmisiones de los usuarios en diferentes celdas [10], afectando a los usuarios del límite de la celda que sufren grandes variaciones en la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) y baja velocidad de transmisión de datos [6].

Aunque el desempeño de los usuarios del límite es restringido, existen algunos esquemas de Coordinación Interferencia Inter-Celda (ICIC), que pueden lograr algunas mejoras en la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) y *Throughput*. Dichos mecanismos buscan evitar las transmisiones simultáneas desde y hacia los terminales en el borde, mediante la imposición de restricciones en la asignación de los Bloques de Recursos (PRB) disponibles, o realizando el control de potencia de cada recurso de tiempo / frecuencia [12].

2.3.1 Interferencia Inter-Celda (ICI)

En una red LTE, el Nodo B Evolucionado (eNB) asigna una subbanda específica para la transmisión de datos a los Equipos de Usuarios (UE) que reciben señales con diferentes niveles de potencia. Las señales transmitidas por otros Nodos B Evolucionados (eNB) en la misma subbanda son consideradas como interferentes y responsables de la disminución de la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) [6].

La intensidad de la señal transmitida por el Nodo B Evolucionado (eNB) a un Equipo de Usuario (UE) se degrada principalmente por [9]:

1. Las pérdidas de trayecto, que varían según la distancia a la que se encuentre el Equipo de Usuario (UE) del Nodo B Evolucionado (eNB).
2. Los altos niveles de interferencia, que aumentan a medida que el Equipo de Usuario (UE) se aproxima a un Nodo B Evolucionado (eNB), distinto del que le brinda el servicio.

¹ Interferencia Intra-Celda (InCI): cuando la interferencia afecta las transmisiones entre los usuarios que son atendidos por una misma celda [10].

En la figura 2.14, el Equipo de Usuario (UE) al estar conectado al Nodo B Evolucionado uno (eNB1) y acercarse al Nodo B Evolucionado dos (eNB2), recibe niveles de interferencia por parte del Nodo B Evolucionado dos (eNB2), ya que en LTE al implementar una reutilización de frecuencia universal (Factor de Reuso igual a uno), permite que los dos Nodos B Evolucionados (eNB) transmitan información sobre los mismos recursos en la misma frecuencia [9].

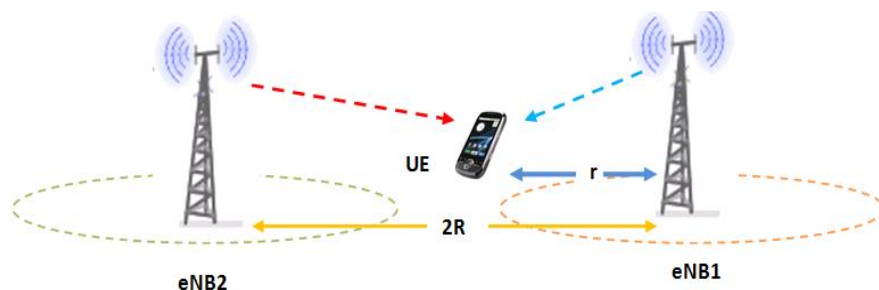


Figura 2. 14 Interferencia Inter-Celda (ICI) [9].

La Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) experimentada por el Equipo de Usuario (UE) a una distancia r desde Nodo B Evolucionado dos (eNB2) se puede expresar de acuerdo a la ecuación 2.1:

$$SINR = \frac{P_1 r^{-\alpha}}{N_0 W + P_2 (2R - r)^{-\alpha}} \quad (2.1)$$

Dónde:

- α : Exponente de pérdidas de trayecto
- P_K : Potencia de transmisión para el k -ésimo Nodo B Evolucionado (eNB).
- R : Radio de la celda
- $2R$: Distancia entre Nodo B Evolucionado uno (eNB1) y Nodo B Evolucionado dos (eNB2)
- r : Distancia entre Nodo B Evolucionado uno (eNB1) y el Equipo de Usuario (UE)
- N_0 : Densidad espectral de potencia de ruido unilateral.
- W : Ancho de banda del canal.

Teniendo en cuenta que las potencias de transmisión de los sistemas celulares son iguales en todos los Nodos B Evolucionados (eNB) se asume que $P_1 = P_2$, y en un escenario limitado por interferencia, al ser el ruido de fondo es despreciable respecto a la interferencia ($N_0 W \rightarrow 0$), la ecuación 2.1 se simplifica como 2.2 [9]:



$$SINR = \left(\frac{2R}{r} - 1 \right)^\alpha \quad (2.2)$$

La degradación de los niveles de Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) aumenta con r , como se observa en la ecuación 2.2. Un Equipo de Usuario (UE) que se encuentre dentro del radio de la celda ($r < R$) experimenta mejores niveles de Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) debido a que la señal interferente del Nodo B Evolucionado (eNB) vecino, al recorrer una mayor distancia, se atenúa por las pérdidas de trayecto que provocan niveles de interferencia bajos.

La Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) experimentada por un Equipo de Usuario (UE) con Interferencia Inter-Celda (ICI) se expresa en la ecuación 2.3.

$$SINR_{ICI} = \frac{P \left(10^{\frac{P_{Ls}}{10}} \right)}{N_0W + P \left(10^{\frac{P_{Li}}{10}} \right)} \quad (2.3)$$

Dónde:

- P_{Ls} : Modelo de pérdidas de trayecto en el Nodo B Evolucionado uno (eNB1)
- P_{Li} : Modelo de pérdidas de trayecto para el Nodo B Evolucionado dos (eNB2) interferente.

Cuando la Interferencia Inter-Celda (ICI) no está presente en el sistema, la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) experimentada por un Equipo de Usuario (UE) se describe en 2.4 como [9]:

$$SINR_{No-ICI} = \frac{P \left(10^{\frac{P_{Ls}}{10}} \right)}{N_0W} \quad (2.4)$$

En LTE la Interferencia Inter-Celda (ICI) se mitiga con mecanismos de gestión de interferencia, que al implementarse, favorecen principalmente a los Equipos de Usuarios (UE) del límite de la celda.

2.3.2 Mitigación de Interferencia Inter-Celda (ICI)

Las técnicas de mitigación de la Interferencia Inter-Celda (ICI) están clasificadas en tres categorías [9]:



- Aleatorización de Interferencia Inter-Celda (ICI).
- Cancelación de Interferencia Inter-Celda (ICI).
- Coordinación o evitación Interferencia Inter-Celda (ICI).

La Aleatorización emplea, después de la codificación de canal, algoritmos de codificación pseudo-aleatorios, que al aleatorizar las señales interferentes generan una pequeña ganancia de procesamiento² que ayuda a suprimir la interferencia en el receptor.

La Cancelación de Interferencia Inter-Celda (ICI) se encarga de cancelar la interferencia en el receptor por esquemas de múltiples antenas o por primera detección/decodificación de la señal interferente para eliminarla antes de procesar la señal original transmitida. Sin embargo, para implementar esta técnica, el Equipo de Usuario (UE) debe decodificar los canales de control de las celdas vecinas para saber el formato de transmisión y la asignación de recursos de la señal interferente, lo cual no es compatible con LTE porque este tipo de señalización no se puede implementar y por lo tanto no es posible realizar la post-decodificación de la cancelación de interferencia.

La Coordinación de Interferencia Inter-Celda (ICIC) restringe la asignación de los recursos de tiempo-frecuencia disponibles en el planificador o limita la potencia de transmisión que debe ser asignada a los recursos tiempo-frecuencia de forma coordinada a todos los Equipos de Usuarios (UE), para mitigar la interferencia; especialmente en el límite de la celda. Tales limitaciones permiten mejorar la Relación Señal a Ruido (SINR) y el *Throughput* en el límite de celda sin degradarlos en el centro, por lo tanto, este trabajo se centra en la técnica de Coordinación de Interferencia Inter-Celda (ICIC) que genera en el sistema mayores ganancias de procesamiento.

2.4 REUSO DE FRECUENCIA FRACCIONAL (FFR)

La técnica de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) es uno de los esquemas empleados para Coordinación de Interferencia Inter-Celda (ICIC). Esta técnica tiene como objetivo la sectorización frecuencial de la celda, mediante la división del Ancho de Banda (BW) del sistema en dos subbandas, las cuales se distribuyen entre los sectores de la celda. De esta forma, la asignación de los recursos se

² **Ganancia de Procesamiento:** se conoce también como ganancia de expansión, se define igual a la expansión del Ancho de Banda (BW) por secuencia directa. También se puede definir como la cantidad que describe el aumento de la Relación Señal a Ruido de la señal, por el proceso de expansión durante la transmisión.

hará de manera exclusiva en cada sector. Una característica de esta técnica es que cada sector implementa un Factor de Reuso de Frecuencia (FRF) diferente, debido a que los Equipos de Usuarios (UE) del centro de la celda experimentan un nivel de interferencia diferente a los Equipos de Usuarios (UE) del límite de la celda. El análisis para determinar el Factor de Reuso de Frecuencia (FRF) a implementar en cada sector se explica a continuación.

- **Desempeño en el límite de celda**

La figura 2.15 representa en colores amarillo, azul y verde once fuentes interferentes que debe soportar un equipo de usuario en el límite de la celda 1. Dos Nodos B Evolucionados (eNB) interferentes se encuentra a una distancia R (de color amarillo), tres a una distancia $2R$ (de color azul) y seis a una distancia de $2.7R$ (de color verde), donde R es el radio de la celda [9].

Según [9], la Densidad Espectral de Potencia (PSD, *Power Spectral Density*) en la celda aumenta en la misma medida en que aumenta el Factor de Reuso de Frecuencia (FRF), ya que si el Ancho de Banda (BW) total se divide según el Factor de Reuso de Frecuencia (FRF) en varias subbandas y se asignan a diferentes celdas, los niveles de Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) en el límite de la celda mejoran, siempre y cuando el Factor de Reuso de Frecuencia (FRF) no sea superior a tres, para que el desempeño del sistema no se vea afectado por asignaciones pequeñas de Ancho de Banda (BW) en cada celda.

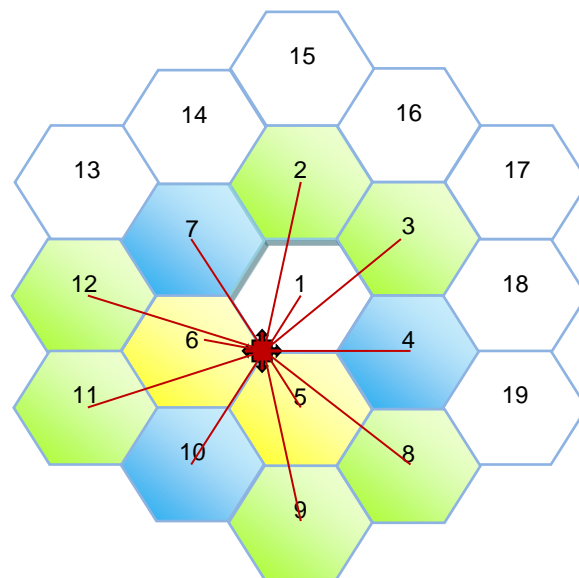


Figura 2.15 Interferencia Experimentada por un Equipo de Usuario (UE) en el Límite de la Celda [9].

- **Desempeño en el centro de la celda**

Como se observa en la figura 2.16, los Equipos de Usuarios (UE) en el centro de la celda experimentan una interferencia de primer nivel por seis celdas (de color verde) ubicadas a una distancia aproximada de $\sqrt{3}R$, que al ser las fuentes interferentes más cercanas a la celda del centro, interfieren en la señal transmitida al Equipo de Usuario (UE) con una potencia de transmisión más alta que las otras doce fuentes interferentes (de color azul), consideradas interferencia de segundo nivel por estar más alejadas (distancia de $3R$ y $2\sqrt{3}R$) [9].

Si se emplean en el centro de la celda altos Factores de Reuso de Frecuencia (FRF), las ganancias que se obtendrán en la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) por mitigación de Interferencia Inter-Celda serán menores que en el límite, ya que los Equipos de Usuarios (UE) del centro, al recibir pequeños niveles de Interferencia Inter-Celda (ICI), no perciben aumentos significativos en la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR), ni en el *Throughput*. Por lo que emplear Factores de Reuso de Frecuencia (FRF) mayores a uno, afectaría significativamente el desempeño en esta zona de la celda [9].

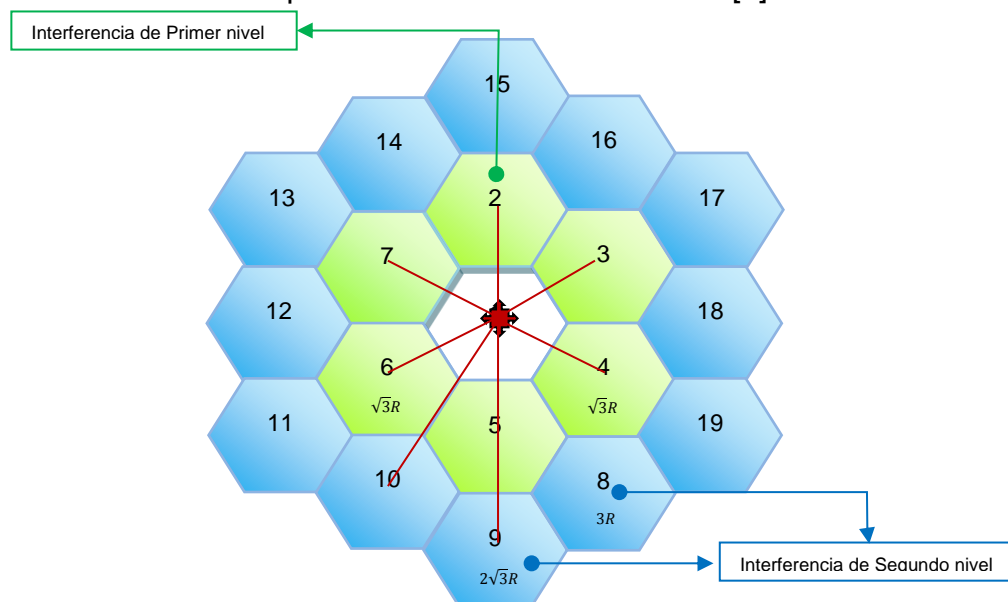


Figura 2.16 Interferencia Experimentada por un Equipo de Usuario (UE) en el Centro de la Celda [9].

2.4.1 Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (*Strict FFR, Strict Fractional Frequency Reuse*).

Como se puede observar en la Figura 2.17, el Ancho de Banda (BW) total se divide en cuatro subbandas: f_1 (Gris), f_2 (Verde), f_3 (Azul), f_4 (Amarillo), donde la subbanda f_1 con un Factor de Reuso de Frecuencia (FRF) de uno, se utiliza para servir a los Equipos de Usuarios (UE) del centro de cada celda, que experimentan una Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) alta, mientras que las subbandas restantes (f_2 , f_3 , f_4) son distribuidas por separado con un Factor de Reuso de Frecuencia (FRF) de tres en la zona límite de las celdas adyacentes, para garantizar que los Equipos de Usuarios (UE) en esta zona no reciban señales interferentes de Nodos B Evolucionados (eNB) vecinos. Este esquema de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) es conocido como Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (*Strict FFR*) [8].

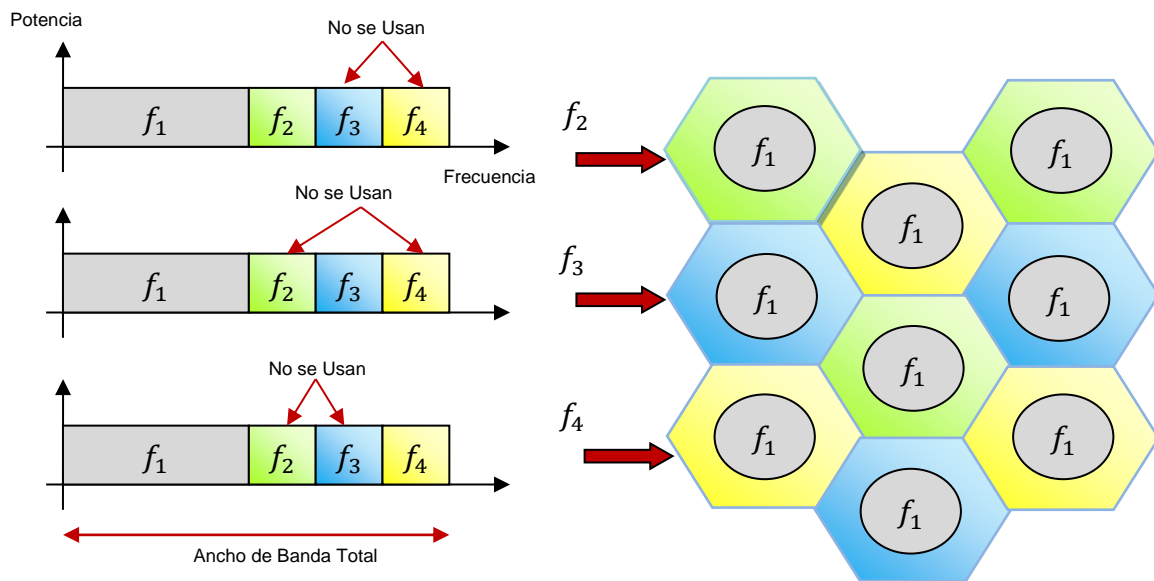


Figura 2.17 Ejemplo de Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (*Strict FFR*) [9].

2.4.2 Reuso de Frecuencia Fraccional Sectorizado (*Sectorized FFR, Sectorized Fractional Frequency Reuse*)

La figura 2.18, muestra la distribución del Reuso de Frecuencia Fraccional Sectorizado (*Sectorized FFR, Sectorized Fractional Frequency Reuse*), más conocido como Reuso de Frecuencia Fraccional 3 (FFR-3, *3 Fractional Frequency Reuse*). Las subbandas f_2 (Verde), f_3 (Amarillo), f_4 (Azul) se emplean en el área límite de la celda en los sectores 1, 2 y 3 respectivamente. Al igual que en el Estricto, la subbanda f_1 (Gris) se asigna al centro con un Factor de Reuso de Frecuencia (FRF) universal para brindar servicio a los usuarios de esta zona. Si por ejemplo, un usuario se encuentra en la zona límite de la celda en el sector 1, este será servido por la subbanda f_2 y los sectores vecinos tendrán asignadas las subbandas f_3 y f_4 , para garantizar que el Equipo de Usuario (UE) del sector 1 no perciba Interferencia Inter-Celda (ICI) de los dos sectores vecinos.

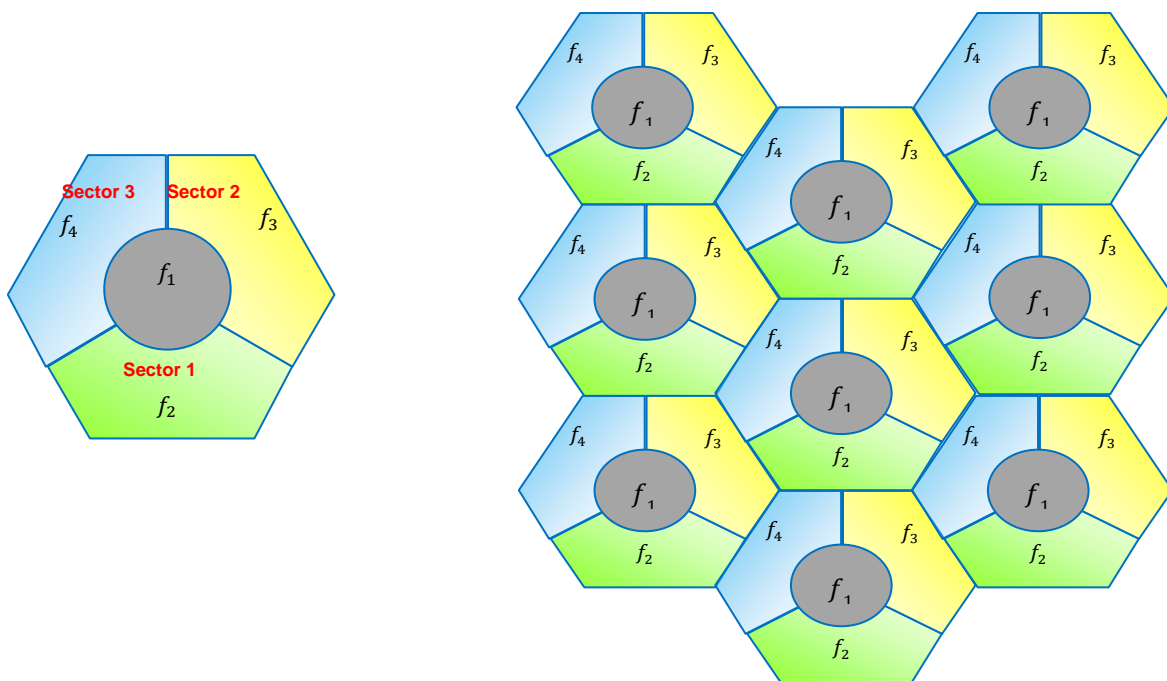


Figura 2.18 Ejemplo de Reuso de Frecuencia Fraccional Sectorizado (*Sectorized FFR*) [9].

2.4.3 Reuso de Frecuencia Fraccional Suave (*Soft FFR, Soft Fractional Frequency Reuse*)

El esquema de Reuso de Frecuencia Fraccional Suave (*Soft FFR, Soft Fractional Frequency Reuse*), utiliza una técnica de partición celular similar a la del Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (*Strict FFR*), con la diferencia de que en la zona centro de cada celda, se asignan subbandas con menor potencia de transmisión, que también se utilizan en el límite de celdas vecinas. Por otra parte, en el límite de cada celda, se asigna con una mayor potencia la porción restante del ancho de banda que no ha sido usado en el centro. El ajuste de potencia permite que todo el Ancho de Banda (BW) sea accesible en cada una de las celdas, permitiendo una mayor eficiencia espectral. Por ejemplo, como se observa en la figura 2.19, la celda superior derecha (color gris en la zona centro y verde en límite) utiliza los recursos de la frecuencia f_1 (Verde) para los Equipos de Usuarios (UE) del límite de celda, mientras que los recursos de las frecuencias f_2 y f_3 (Gris) son usados en conjunto para brindar servicio a los Equipos de Usuarios (UE) del centro con una potencia más baja.

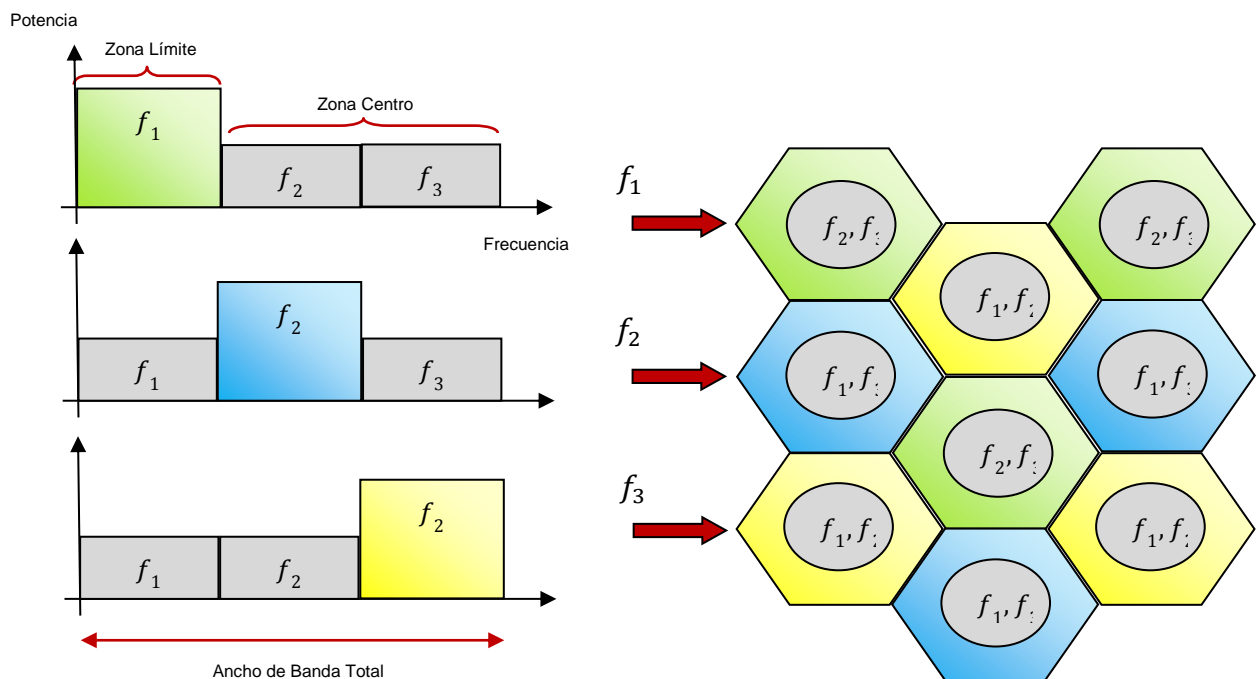


Figura 2.19 Ejemplo de Reuso de Frecuencia Fraccional Suave (*Soft FFR*) [9].



3. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO

Este capítulo presenta el desarrollo de la metodología de trabajo para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos, teniendo en cuenta los parámetros de simulación, el plan de pruebas, el proceso de desarrollo y el análisis de la simulación para el Reuso de Frecuencia Estricto (*Strict FFR*) debido a las limitaciones del software.

3.1 PROCESO DE DESARROLLO DE UNA SIMULACIÓN

La metodología empleada para diseñar, implementar y analizar la técnica de Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (*Strict FFR*) en un sistema LTE, es una adaptación de la Metodología de Simulación de Sistemas de Telecomunicaciones, la cual se muestra en la figura 3.1 [13].

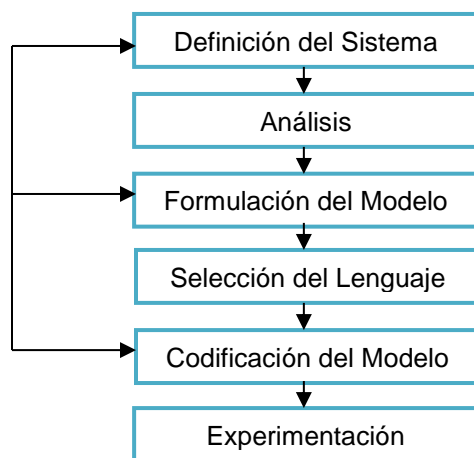


Figura 3.1 Diagrama de Flujo de la Metodología Empleada para la Simulación.

A continuación se detalla el desarrollo de cada fase.

3.2 FASE 1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA

Se analiza un sistema LTE en el Enlace de Bajada (DL) en configuración Única Entrada Única Salida (SISO, *Single Input and Single Output*), empleando planificadores como *Round Robin* (RR) y *Proportional Fair* (PF) con canales como:



PedA³, PedB⁴, VehA⁵, VehB⁶, ExtPedB⁷ o Winner+⁸ y la técnica de coordinación de interferencia Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (*Strict FFR*).

3.3 FASE 2 ANÁLISIS

Estado del sistema: en la simulación del sistema se emplean dos tipos de variables clasificadas como principales y secundarias. Las variables principales están directamente relacionadas con los resultados de simulación obtenidos, mientras que las secundarias, son los eventos que al variarse influyen en los valores de las variables principales.

- **VARIABLES PRINCIPALES**
 - SINR
 - *Throughput*

- **VARIABLES SECUNDARIAS**
 - FFR Estricto
 - Potencia de transmisión del eNodeB
 - Modelo del canal
 - Planificador
 - Número de UE por celda
 - Posición de los UE
 - Número de celdas
 - Radio de la celda
 - Modelo de propagación

Actividad: la detección de la señal transmitida a los Equipos de Usuarios (UE) desde el Nodo B Evolucionado (eNB) empleando el esquema de Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (*Strict FFR*), es la actividad más importante en la simulación de este trabajo. La variación de la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) en recepción depende principalmente de la potencia de transmisión, del número de celdas y la posición en la que se encuentren los Equipos de Usuarios (UE) del Nodo B Evolucionado (eNB).

³ Canal Peatonal A (**PedA**, *Pedestrian A Channel*) [14].

⁴ Canal Peatonal B (**PedB**, *Pedestrian B Channel*) [14].

⁵ Canal Vehicular A (**VehA**, *Vehicular A Channel*) [14].

⁶ Canal Vehicular B (**VehB**, *Vehicular B Channel*) [14].

⁷ **ExtPedB**: extensión de los modelos de canal ITU para los sistemas de Banda Ancha (OFDM) [15].

⁸ **Winner+**: modelo de canal basado en WINNER II+ [16].



El modelo del canal, el planificador, el número de Equipos de Usuarios (UE) y el Ancho de Banda (BW) empleado en cada zona, también son variables que influyen en los resultados de Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR).

Entidades: las entidades dinámicas clasificadas como objetos implementadas dentro del sistema son: Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (*Strict FFR*), modelo del canal, planificador, número de celdas en el sistema, posición y Equipos de Usuarios (UE) por celda.

Las entidades estáticas son las correspondientes a la asignación de las subbandas en los distintos sectores de la celda que depende directamente del tipo de entidades dinámicas.

3.4 FASE 3 FORMULACIÓN DEL MODELO

Teniendo en cuenta el análisis realizado, se genera un modelo lógico-matemático en el cual se definen las variables que forman parte del sistema, diagramas de flujo y diagrama de bloques.

Este trabajo de grado se enfoca en la técnica de coordinación de interferencia Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (*Strict FFR*), por lo tanto la formulación del modelo se realiza teniendo en cuenta los parámetros y variables involucrados para su desarrollo.

En la figura 3.2 se presenta un diagrama de bloques del sistema con Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (*Strict FFR*).

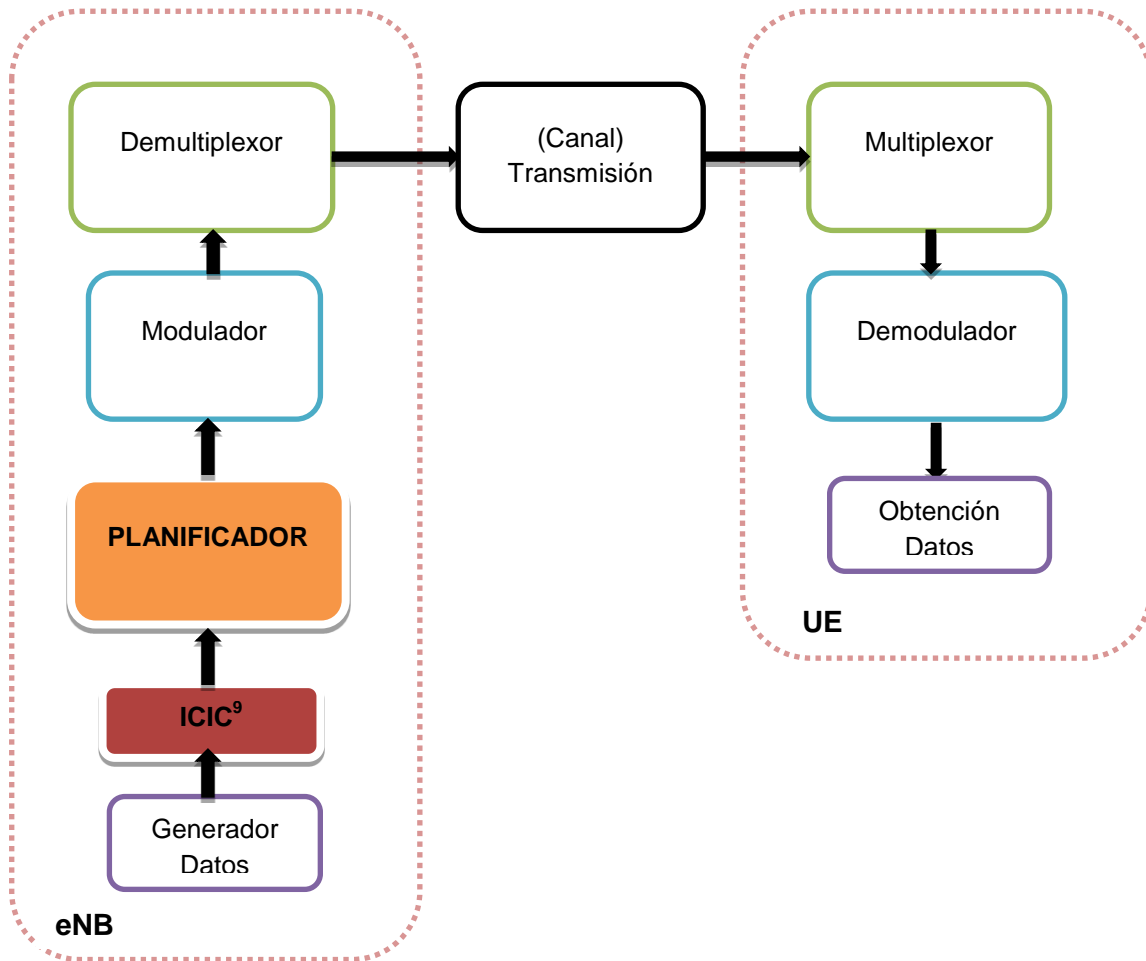


Figura 3.2 Diagrama de Bloques del Sistema con Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR).

⁹ Coordinación de Interferencia Inter-Celda (ICIC, *Inter-Cell Interference Coordination*)



Diagrama de Flujo del Sistema con Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR)

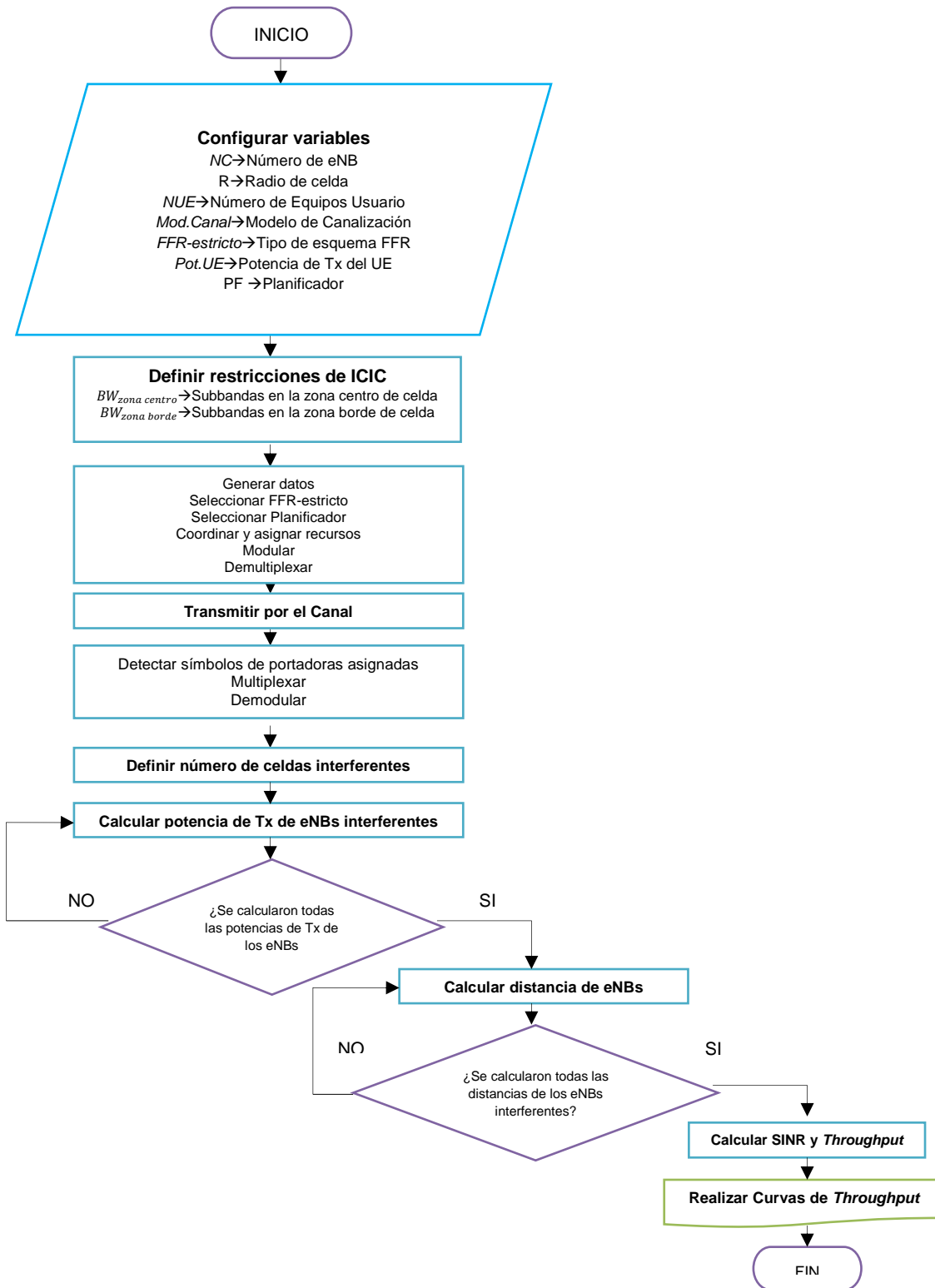


Figura 3.3 Diagrama de Flujo del Sistema con Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR).



En la figura 3.3 se presenta el diagrama de flujo del sistema con Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) y en la figura 3.4 se presenta detalladamente el funcionamiento del esquema de Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (*Strict FFR*).

3.4.1 Diagrama de Flujo de la Técnica Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (*Strict FFR*)

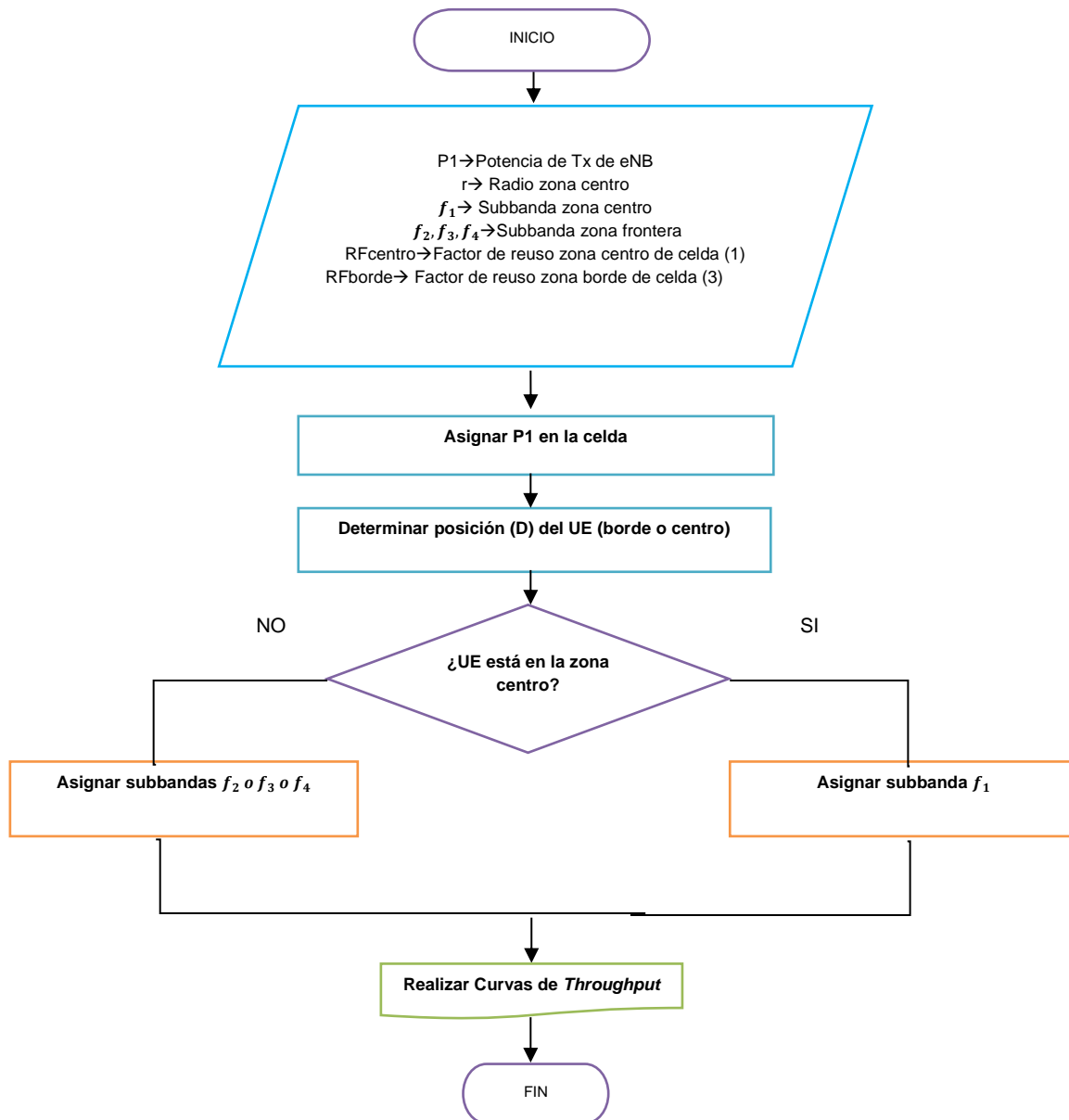


Figura 3.4 Diagrama de Flujo de la Técnica Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (*Strict FFR*).



3.5 FASE 4 SELECCIÓN DEL LENGUAJE

En la selección de la herramienta de simulación se debe considerar el tipo de sistema a simular y el presupuesto del trabajo de grado; debido a que la mayoría de las herramientas de simulación requieren de licencia, y no cuenta con la técnica de coordinación de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR), se eligió el simulador LTE de Viena [17] a nivel de sistema desarrollado en MATLAB, ya que permite evaluar el desempeño de las nuevas tecnologías de red móvil, además, la Universidad de Cauca tiene licencia de la misma.

El simulador LTE de Viena a nivel de sistema es un software capaz de evaluar el rendimiento del Enlace de Bajada (DL) para redes LTE Única Entrada Única Salida (SISO) y Múltiple Entrada Múltiple Salida (MIMO) con amplias características de configuración, capaz de reflejar los efectos de la planeación celular, planificación, o interferencia en redes [17]. Tiene licencia académica no comercial desarrollado por Josep Colom Ikuno, Martin Wrulich y Markus Rupp en el Instituto de Comunicaciones e Ingeniería de Radio-Frecuencia de la Universidad de Viena, Austria.

El simulador posee un código modular con estructura clara, basada en objetos, lo que lo hace mucho más organizado, comprensible y estructurado, capaz de permitir implementar y probar nuevas funcionalidades y algoritmos. Esta herramienta de uso académico, empleada en el desarrollo de trabajos de investigación a nivel mundial, posee gran aceptación y validación de su estructura, haciéndola la herramienta más adecuada para el desarrollo de este trabajo de grado [17].

3.6 FASE 5 CODIFICACIÓN DEL MODELO

La codificación del modelo empleado en el simulador LTE de Viena a nivel de sistema consta de los siguientes archivos de simulación:

- **LTE_sim_main.m**

Es el archivo principal del simulador, encargado de establecer el orden de ejecución de los demás archivos del código. Algunos fragmentos de este archivo se observan en la Figura 3.5.



```
%% Call load_params_dependant
LTE_config = LTE_load_params_dependant (LTE_config);
DEBUG_LEVEL = LTE_config.debug_level;
varargin {4} = []; % To avoid having an empty varargin variable

%% Load and plot BLER curves
[BLER_curves, CQI_mapper] = LTE_init_load_BLER_curves (LTE_config);

%% Get the eNodeBs, the Macroscopic Pathloss and the Shadow Fading
% No need to generate shadow fading maps when using network planning
tool
[eNodeB_sites, eNodeBs, networkPathlossMap, networkShadowFadingMap]
= LTE_init_network_generation (LTE_config, varargin);
varargin{2} = []; % clear varargin{2}
```

Figura 3.5 Fragmento de código del archivo principal.

- **LTE_sim_main_launcher_examples.m**

Es el archivo de ejecución del simulador encargado de establecer los valores de los parámetros de simulación empleados en los demás archivos, mediante él es posible obtener las variables de datos e implementar simulaciones consecutivas. En la Figura 3.6 se observan algunas líneas de código de dicho archivo.

```
simulation_type = 'tri_sector_tilted';
LTE_config.bandwidth = 20e6;
LTE_config.scheduler = 'FFR'; % prop fair Sun % round robin

UE_list = cell(1,length(simulation_data.UEs));
for u =1:length(simulation_data.UEs)
    UE_list{u_} = sprintf('%g',u_);
end

cell_list = cell(1,length(simulation_data.eNodeBs));
for c =1:length(simulation_data.eNodeBs)
    cell_list{c_} = sprintf('%g',c_);
end

simulation_data.UE_list = UE_list;
simulation_data.cell_list = cell_list;

fprintf('Matriz %s\n',matriz);
xlswrite('SINR15.xlsx',matriz,'beta1','A1');
xlswrite('SINR10.xlsx',matriz(:),'beta0.50','A56701');
```

Figura 3.6 Fragmento de código del archivo ejemplo.



- **LTE_load_params.m**

Este archivo permite cargar los parámetros de simulación y modificar algunas variables previamente establecidas, en la Figura 3.7 se observa algunas de sus líneas de código.

```
%% Default simulation option
default_simulation = 'tri_sector_tilted';

%% Some adjustments to the loaded simulation parameters
switch simulation_type
    case 'tri_sector'
        LTE_config.results_file           = 'auto';
        LTE_config.output_filename_suffix = 'tri_sector';
    case 'tri_sector_tilted'
        LTE_config.results_file           = 'auto';
        LTE_config.output_filename_suffix =
'tri_sector_tilted';
        LTE_config.compute_only_UEs_from_this_eNodeBs = [13 14 15
16 17 18 19 20 21 28 29 30 31 32 33 34 35 36 46 47 48];
        LTE_config.default_shown_GUI_cells = [13 14 15
16 17 18 19 20 21 28 29 30 31 32 33 34 35 36 46 47 48];
    case 'stochastic_tri_sector_tilted'
        LTE_config.results_file           = 'auto';
        LTE_config.output_filename_suffix =
'stochastic_tri_sector_tilted';
```

Figura 3.7 Fragmento de código del archivo parámetros.

- **LTE_load_params_dependant.m**

Este archivo permite generar parámetros de simulación adicionales a los parámetros de simulación básicos, en la Figura 3.8 se observa algunas configuraciones empleadas en este archivo.

```
% Macroscopic pathloss settings
if ~isfield(LTE_config, 'macroscopic_pathloss_model_settings')
    LTE_config.macroscopic_pathloss_model_settings = []; % Mimic
old behavior
end
% eNodeB (macro) Tx height
if ~isfield(LTE_config, 'tx_height')
    LTE_config.tx_height = 32; % [m] According to 3GPP 36.814 Table
A.2.1.1-2. The transmitter height
end
% UE receiver height
if ~isfield(LTE_config, 'rx_height')
    LTE_config.rx_height = 1.5; % [m] Mimic old behavior
end
```

Figura 3.8 Fragmento de código del archivo parámetros adicionales.



- **hex_grid_tilted.m**

Archivo que permite cargar los parámetros de simulación y establecer las opciones para cada planificador, entre otras funciones, en la Figura 3.9 se observan algunas de sus líneas de configuración.

```
%% General options
LTE_config.frequency = 2e9;           % Frequency in Hz
LTE_config.bandwidth = 20e6;         % Frequency in Hz
LTE_config.nTX = 1;
LTE_config.nRX = 1;
LTE_config.tx_mode = 1; % SISO
%% Microscale Fading Generation config
% Microscale fading trace to be used between the eNodeB and its
attached UEs.
LTE_config.channel_model.type = 'PedA'; % 'winner+' 'PedB'
'extPedB' 'TU' --> the PDP to use

%% Scheduler options
LTE_config.scheduler = 'FFR'; % 'round robin', 'best cqi', 'max
min', 'max TP', 'resource fair', or 'prop fair Sun'
LTE_config.scheduler_params.FR_scheduler.scheduler = 'prop fair
Sun';
LTE_config.scheduler_params.PR_scheduler.scheduler = 'prop fair
Sun':
```

Figura 3.9 Fragmento de código del archivo configuración.

- **Launcher_FFR_performance_simulations.m**

Este archivo permite configurar los parámetros del planificador FFR, además de generar los valores de ganancia para todos los rangos e intervalos de SINR y Ancho de Banda (BW) configurados. En la Figura 3.10 se observa algunas de sus líneas de código.



```
beta_FR_vect          = 1:-0.03:0.01; % 1=Reuse-1, 0=Reuse-3
SINR_threshold_vect  = -2:0.25:22.50; % If UE_SINR<SIRN_threshold,
this UE is a PR UE (and viceversa). beta=1 and a very low is the
"normal" reuse-1 LTE
antenna_configs      = {[1 1]};
scheduler_configs    = {'prop fair Sun'}; {'round robin' 'prop
fair Sun'};
    for beta_FR_idx = 1:length(beta_FR_vect)
        beta_FR = beta_FR_vect(beta_FR_idx);
        for SINR_threshold_idx = 1:length(SINR_threshold_vect)
            for rep_idx = 1

                %% Scheduler options (FFR)
                % LTE_config.scheduler = 'round robin';
                LTE_config.scheduler = 'FFR'; %
'round robin', 'best cqi', 'max min', 'max TP', 'resource fair',
'prop fair Sun'
                % Scheduling options for the full reuse part
scheduler

LTE_config.scheduler_params.FR_scheduler.scheduler =
scheduler_to_use;

LTE_config.scheduler_params.FR_scheduler.av_window = 25;
                % Scheduling options for the partial reuse part
scheduler

LTE_config.scheduler_params.PR_scheduler.scheduler =
scheduler_to_use;

LTE_config.scheduler_params.PR_scheduler.av_window = 25;
```

Figura 3.10 Fragmento de código del archivo del planificador FFR



- **Postprocess_FFR_results.m**

Este archivo se encarga de clasificar los datos y guardarlos en forma de matriz dentro de la carpeta especificada. En la Figura 3.11 se observa algunas de sus líneas de código.

```
filelist =
dir(fullfile(results_folder, '*.mat'));
first_file = true;
SINR_vect = [];
beta_idx_to_val_mapping = [];

output_folder = fullfile(results_folder, 'results');
mkdir(output_folder);
output_file =
fullfile(output_folder, sprintf('%s.mat', results_filename));
save(output_file, 'results_struct');
```

Figura 3.11 Fragmento de código del archivo procesos posteriores de FFR.

- **Plot_postprocessed_FFR_results**

Archivo encargado de mostrar las gráficas de *Throughput*, *SINR* entre otras. En la Figura 3.12 se observan algunas líneas para desplegar las ganancias de *Throughput* en cada una de las zonas.

```
%% Plot throughput gain plots (%) > 0%

plot_surf(beta_FR_mat, SINR_threshold_mat, UE_results.p95_diff_pp,
'Positive Peak throughput
gain', SINR_lims, UE_p95_throughput_gain_zone, output_plots_folder);

plot_surf(beta_FR_mat, SINR_threshold_mat, UE_results.mean_diff_pp, 'P
ositive Mean throughput
gain', SINR_lims, UE_mean_throughput_gain_zone, output_plots_folder);

plot_surf(beta_FR_mat, SINR_threshold_mat, UE_results.p05_diff_pp,
'Positive Edge throughput
gain', SINR_lims, UE_p05_throughput_gain_zone, output_plots_folder);
```

Figura 3.12 Fragmento de código del archivo gráfico de FFR.



3.7 FASE 6 EXPERIMENTACIÓN

Con el fin de realizar un análisis comparativo de la interferencia y la capacidad de la técnica Reuso de Frecuencia Fraccional Estricto (*Strict FFR*), la fase de experimentación tiene en cuenta los parámetros que constituyen variables de entrada dentro del simulador para realizar las posibles combinaciones en un mismo sistema. En el siguiente capítulo se presentan los diferentes escenarios de simulación para llevar a cabo dicho análisis.

4.RESULTADOS

En este capítulo, se evalúa a nivel de sistema el desempeño de la técnica de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) en redes LTE, la cual se basa en emplear al mismo tiempo diferentes factores de reuso de frecuencia dentro de una celda, para garantizar que haya mejora en el desempeño de los usuarios del borde de la celda a la vez que se mantenga el desempeño de la zona centro [18].

4.1 MODELO DEL SISTEMA

El escenario considerado es una red LTE con celdas hexagonales desplegadas con un número constante de Equipos de Usuario (UE) distribuidos aleatoriamente, empleando una configuración de antenas Única Entrada Única Salida (SISO) y planificadores *Round Robin* y *Proportional Fair*.

En la Figura 4.1 se muestra que cada Nodo B Evolucionado (eNB) tiene 3 sectores en forma hexagonal. Cada celda se divide en una zona centro, denominada zona de Reuso Completo (FR, *Full Reuse*) y una zona borde, denominada zona de Reuso Parcial (PR, *Partial Reuse*). En las zonas de Reuso Parcial (PR), tres bandas de frecuencia se asignan cíclicamente (reuso-3), mientras que en las zonas de Reuso Completo (FR), la misma frecuencia se emplea siempre (reuso-1) [19].

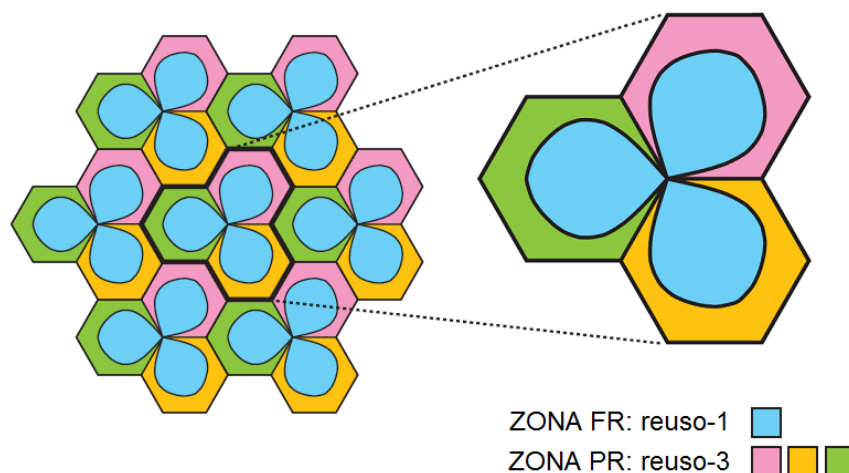


Figura 4.1 Asignación de frecuencias en las celdas.

En la Figura 4.2 se observa cómo una fracción del Ancho de Banda total (β_{FR}) se asigna a la banda de frecuencia empleada en las zonas de Reuso Completo (FR), representada en color azul, mientras que la proporción de Ancho de Banda (BW) restante, $(1 - \beta_{FR})$, es asignada a cada una de las tres bandas en color rosa, naranja y verde del Reuso Parcial (PR), es decir $(1 - \beta_{FR}) / 3$ se asigna a cada zona del borde de la celda [18].

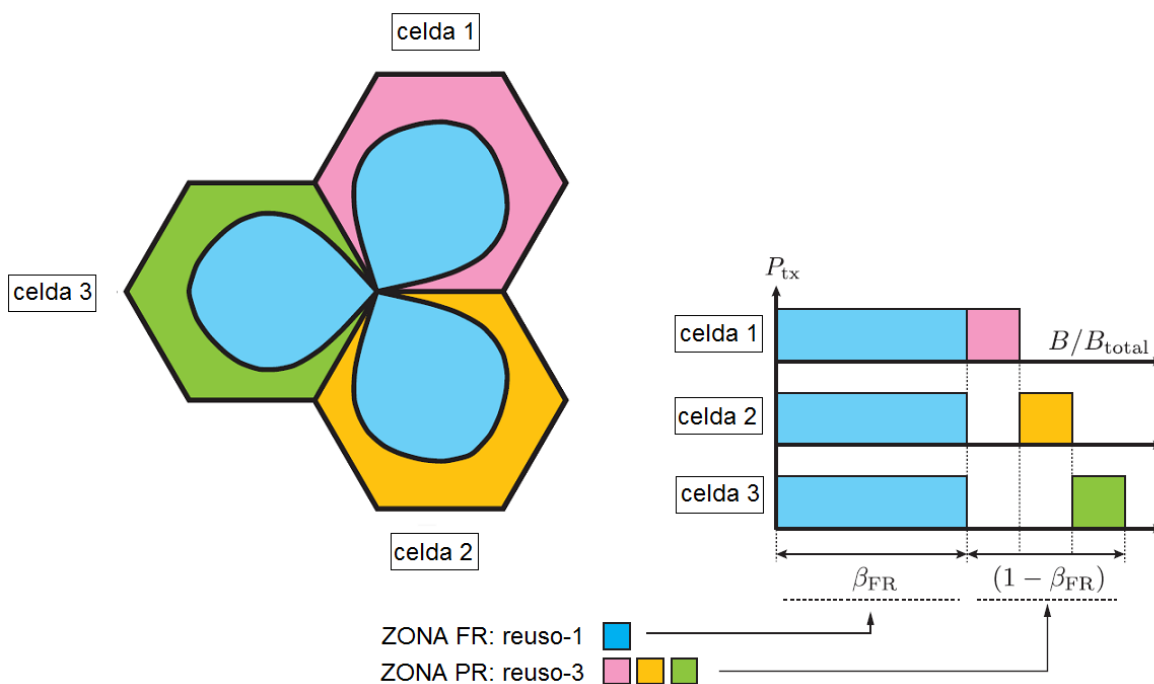


Figura 4.2 Asignación de Ancho de Banda (BW) en las bandas de frecuencia empleadas.

Es importante observar que hay 2 parámetros principales en la configuración de recursos para la zona de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR) como son:

- **Partición del Ancho de Banda (BW):** denominado β_{FR} , es el valor que determina la banda en frecuencia a ser empleada en la zona de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR). Es clave resaltar que, debido a que la partición de frecuencia en LTE se basa en Bloques de Recursos Físicos (PRB), dicha asignación está obligada a proporcionar un número entero a cada zona, por lo tanto, las variaciones de β_{FR} van desde 0.01, 0.04,.... Hasta 1 (los valores empleados facilitan la repartición de recursos, teniendo en cuenta que para el caso de 100 PRBs no se pueden distribuir por igual entre las 3 zonas de Reuso Parcial (PR)) [18].



- **Umbral de Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR):** denominado Γ_{thr} , es el valor que delimita el área de la celda asignado a cada zona, mediante este se especifica el valor de SINR en el que se realiza la conmutación entre las zonas de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR), considerando un rango de SINR desde 22.5 dB hasta -2dB, valores que abarcan el máximo valor presente en la zona centro y el mínimo valor de potencia considerado para un usuario en la zona borde [18]. El umbral de SINR (Γ_{thr}) se define en la Ecuación 4.1:

$$\Gamma_{thr} = \frac{G_{antena} L_{macro,0} P_{tx0}}{\sigma_n^2 + \sum_{m=1}^{N_{int}} L_{macro,l} P_{txl}} \quad (4.1)$$

Dónde:

G_{antena} : Ganancia de la antena (dB).

$L_{macro,0}$: Pérdidas macroscópicas de la señal transmitida (dB).

P_{tx0} : Potencia de transmisión de la Estación Base (dB).

$L_{macro,l}$: Pérdidas macroscópicas de la señal interferente (dB).

P_{txl} : Potencia de transmisión de la Estación Base interferente (dB).

σ_n^2 : Potencia de ruido promedio por antena receptora (dB).

En la Figura 4.3 se observan los umbrales de SINR definidos para las simulaciones, los cuales se encuentran dentro del rango previamente establecido y comprenden todas las sectorizaciones de la celda.

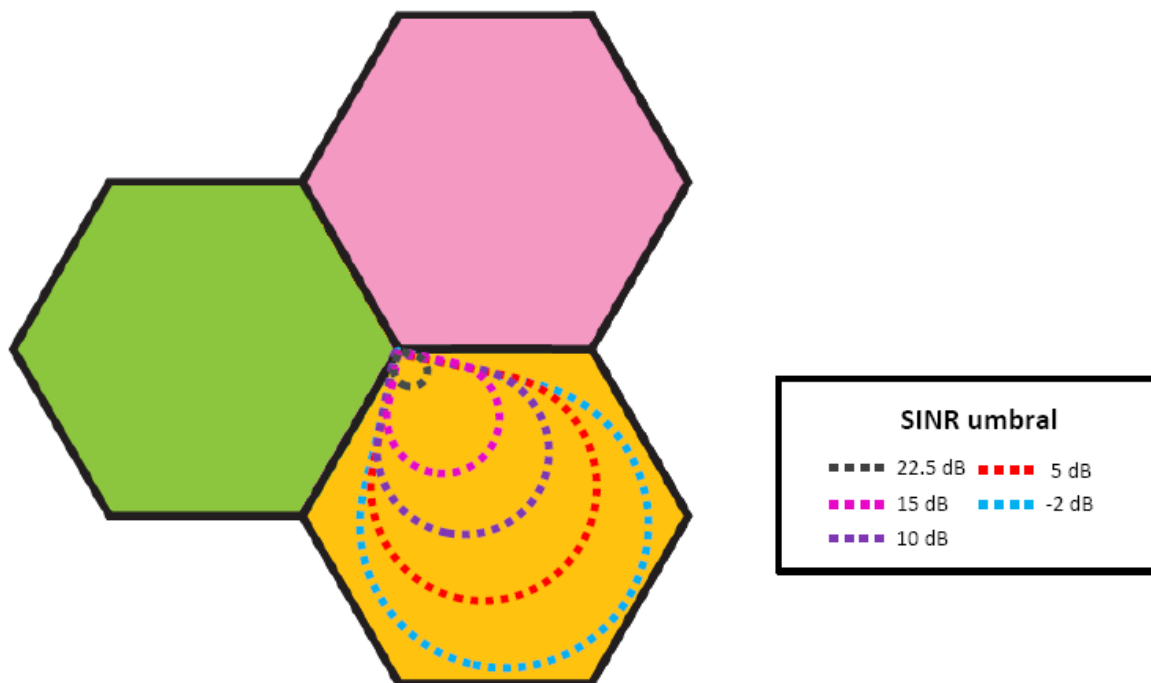


Figura 4.3 Umbrales de SINR para las zonas de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR).

4.2 CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN

En la tabla 4.1 se muestra la lista completa de los parámetros de simulación, se emplearon 2 algoritmos de planificación *Round Robin* y *Proportional Fair*, los cuales son aplicados tanto en la zona de Reuso Completo (FR) como de Reuso Parcial (PR).

Parámetros de Simulación		
Frecuencia	2 GHz	
Ancho de Banda Total	20 MHz (100 PRBs)	
Distancia entre eNodeBs	500 m	
Número eNBs considerados	7 sitios (21 celdas)	
Número de UEs por celda	30	
Perdida min de acoplamiento(REC 36.942)	de TS	70 dB Zona Urbana



modelo de pérdida de propagación macroscópica	Zona Urbana ¹⁰ $L = 40(1 - 4 * 10^{-3} * h_{BS}) * \log_{10}(R) - 18 \log_{10}(h_{BS}) + 21 \log_{10}(f) + 80 \text{ dB}$
Desvanecimiento por Sombra	Ninguno
Tipo de Antena	kathrein 742212
Arreglo de Antenas	1x1
Potencia de transmisión	40 w
Ganancia Antena	15 dBi
Altura del Transmisor	20 m
Altura del Receptor	1.5 m
Modelo de Canal	Winner fase II
Velocidad de los UEs	1,38 m/s (ITU Peatonal A)
Figura de Ruido	7 dB
Densidad de ruido térmico	-174 dB / Hz
Rango de SINR Umbral (Γ_{thr})	-2:0.25:22.5 (99 valores)
Rango de la tasa de β_{FR}	0.01:0.03:1 (34 valores)
Número total de simulaciones	3366
Modelo de Trafico	Full Buffer ¹¹
Modelado Receptor	Zero Forcing ¹²
Algoritmos de Planificación	-Round Robin -Proportional Fair

Tabla 4.1 Parámetros de simulación empleados para las simulaciones de FFR en LTE.

Considerando el número de valores de β_{FR} y Γ_{thr} se realizaron en total 3366 simulaciones, a través de las cuales se evaluó el rendimiento de las posibles configuraciones con cada planificador.

¹⁰ h_{BS} : Altura de la antena de la Estacion Base (BS) en metros.

R : Distancia del Equipo de Usuario (UE) a la Estacion Base (BS) en Km.

f : Frecuencia portadora en MHz.

¹¹ Buffer: Memoria en la que se almacenan datos de manera temporal para ser procesados.

¹² Zero Forcing: Ecualizador que aplica la inversa de la respuesta en frecuencia del canal a la señal recibida, para restaurar la señal transmitida después del canal.



4.3 CONFIGURACIÓN DE ESCENARIOS

Se diseñaron diferentes escenarios de acuerdo al esquema de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) y a los parámetros β_{FR} y Γ_{thr} , que definen cómo implementar la técnica de Coordinación de Interferencia Inter-Celda (ICIC). Para ello se emplearon diferentes valores de configuración con cada planificador, como se observa en la Tabla 4.2.

Algoritmo de Planificación	SINR Umbral, Γ_{thr} (dB)	β_{FR}
Round Robin/ Proportional Fair	-2	1
		0.75
		0.50
		0.25
		0.01
	10	1
		0.75
		0.50
		0.25
		0.01
	15	1
		0.75
		0.50
		0.25
		0.01
	22.5	1
		0.75
		0.50
		0.25
		0.01

Tabla 4.2 Escenarios de simulación de FFR.

El esquema de una de las simulaciones se muestra en la Figura 4.4. Este corresponde a la configuración de $\Gamma_{thr} = 10$ dB y $\beta_{FR} = 0.5$. En ella se puede observar cómo la zona de Reuso Completo (FR) se diferencia de la zona borde, empleando la banda en frecuencia de color morado correspondiente al 50% de la banda total, con un reuso de 1 en cada celda. Para la zona de Reuso Parcial (PR), se emplean las bandas verde, naranja y rosa correspondientes al otro 50 % de la banda total con un reuso de 3. Es decir cada 3 celdas se utiliza una de estas subbandas.

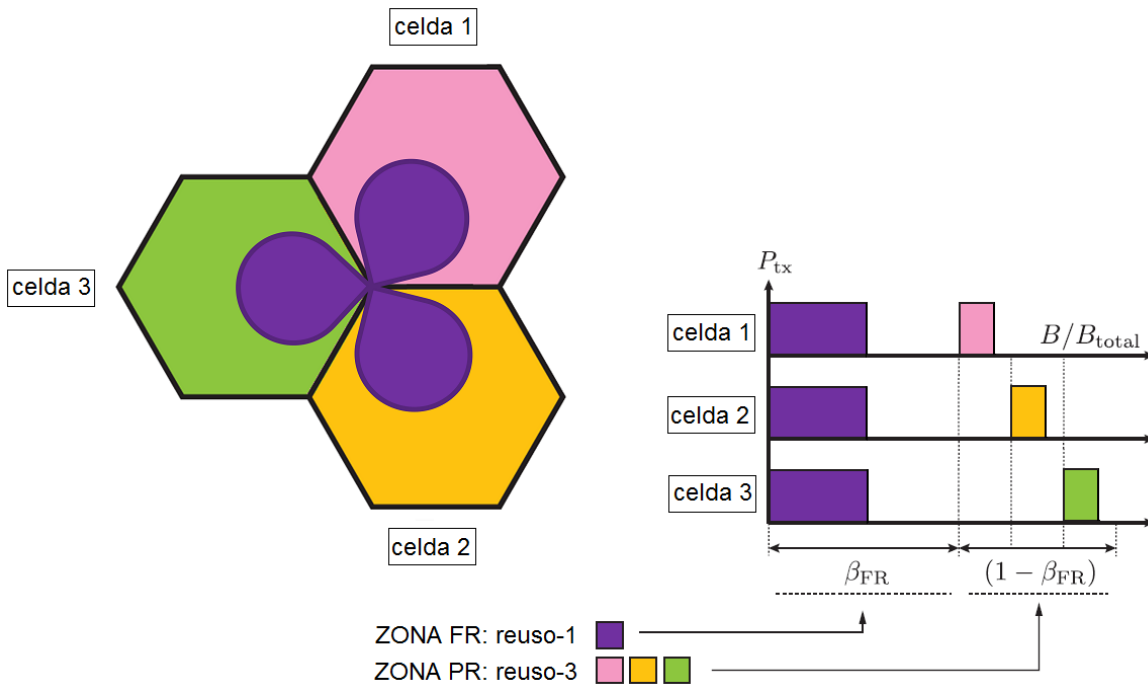


Figura 4.4 Separación de una celda con Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR), empleando reuso 1 y reuso 3, respectivamente.

Los resultados de esta simulación se muestran en la Figura 4.5, donde se puede observar la distribución de los usuarios y los Nodos B Evolucionados (eNB), así como la delimitación de la zona de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR) en cada uno de los sectores. Dicha gráfica permite identificar los usuarios activos e inactivos en color azul y rojo respectivamente, los cuales se tienen en cuenta en la simulación, así mismo marcados con puntos azules están los Equipos de Usuario (UE) del Reuso Completo (FR) y marcados con cruces azules están los Equipos de Usuario (UE) del Reuso Parcial (PR).

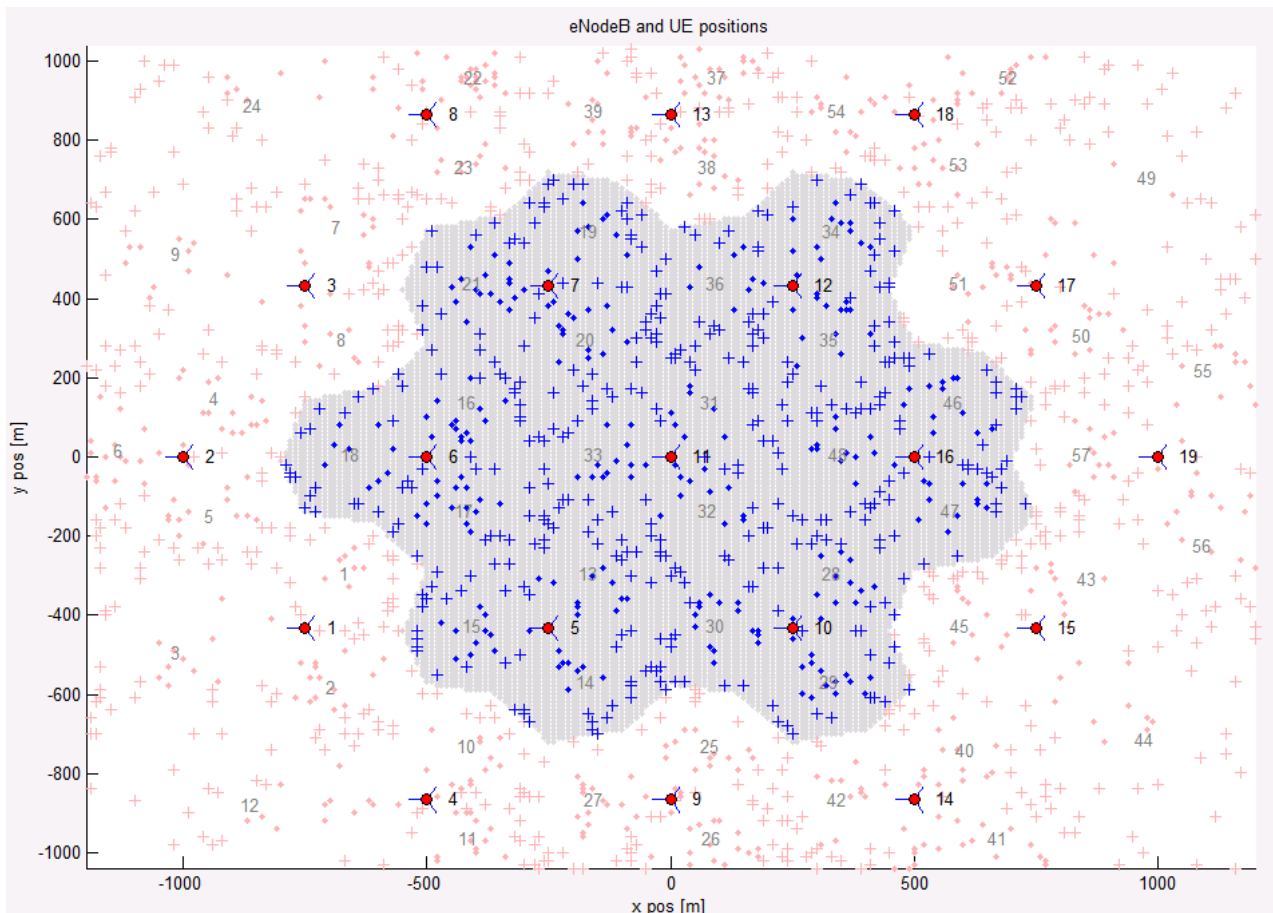


Figura 4.5 Distribución de usuarios en una red LTE con FFR.

Más detalladamente, en la Figura 4.6 se observa la distribución de los Equipos de Usuario (UE) centro (puntos azules) y borde (cruces azules) en donde la zona de Reuso Completo (FR) se extiende en la dirección en que irradian las antenas del Nodo B Evolucionado (eNB), formando un pétalo para cada sitio.

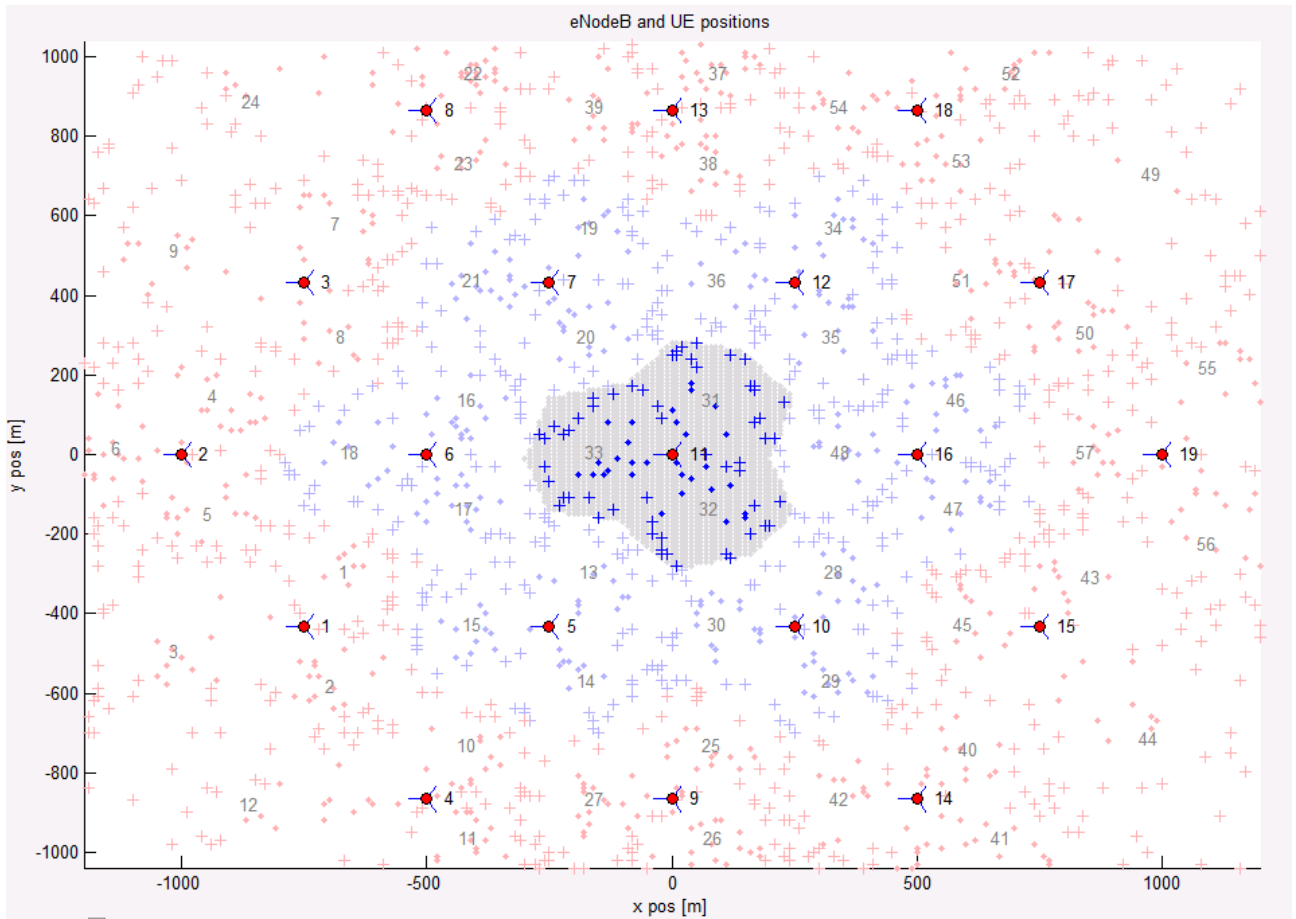


Figura 4.6 Separación de una celda mostrando la distribución de los usuarios en las zonas FR y PR.

Las Figura 4.5 y 4.6, son similares para los demás escenarios, por tanto se definen los esquemas para las simulaciones planteadas en la Tabla 4.2.



SINR 15 dB

En las Figuras 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 y 4.11 se muestra claramente los esquemas de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) para el umbral de SINR 15dB, con los diferentes valores de Ancho de Banda (BW) empleados en las zonas de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR).

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 15$ dB y $\beta_{FR} = 1$

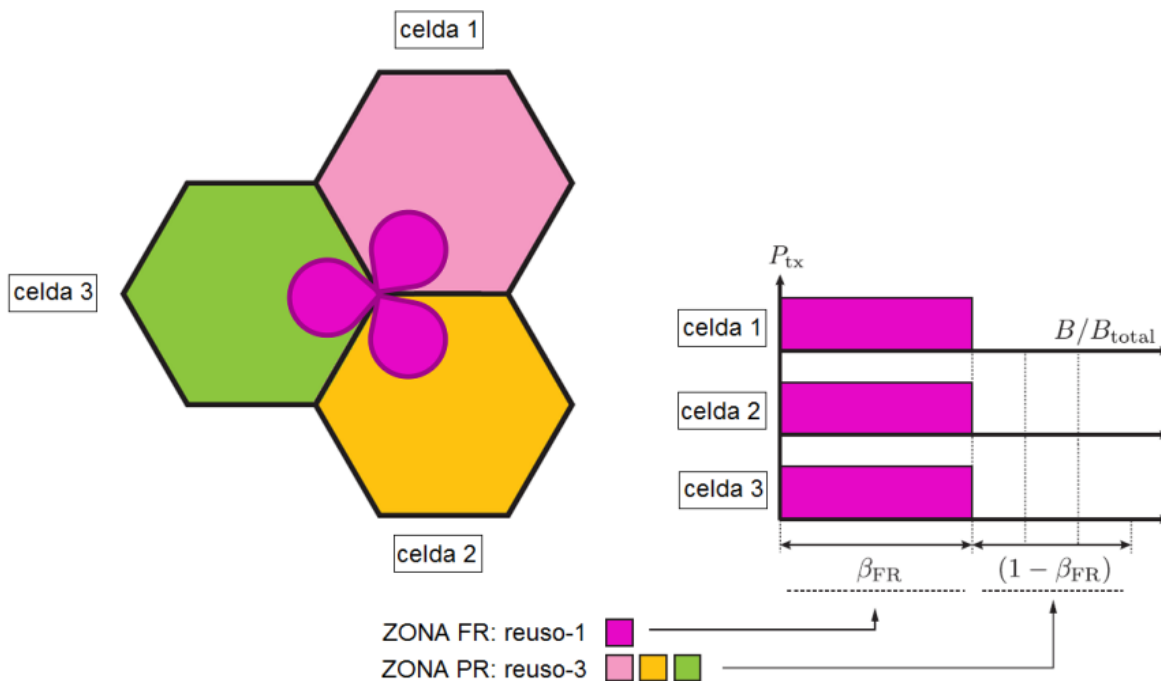


Figura 4.7 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 15$ dB y $\beta_{FR} = 1$.



- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 15$ dB y $\beta_{FR} = 0.75$

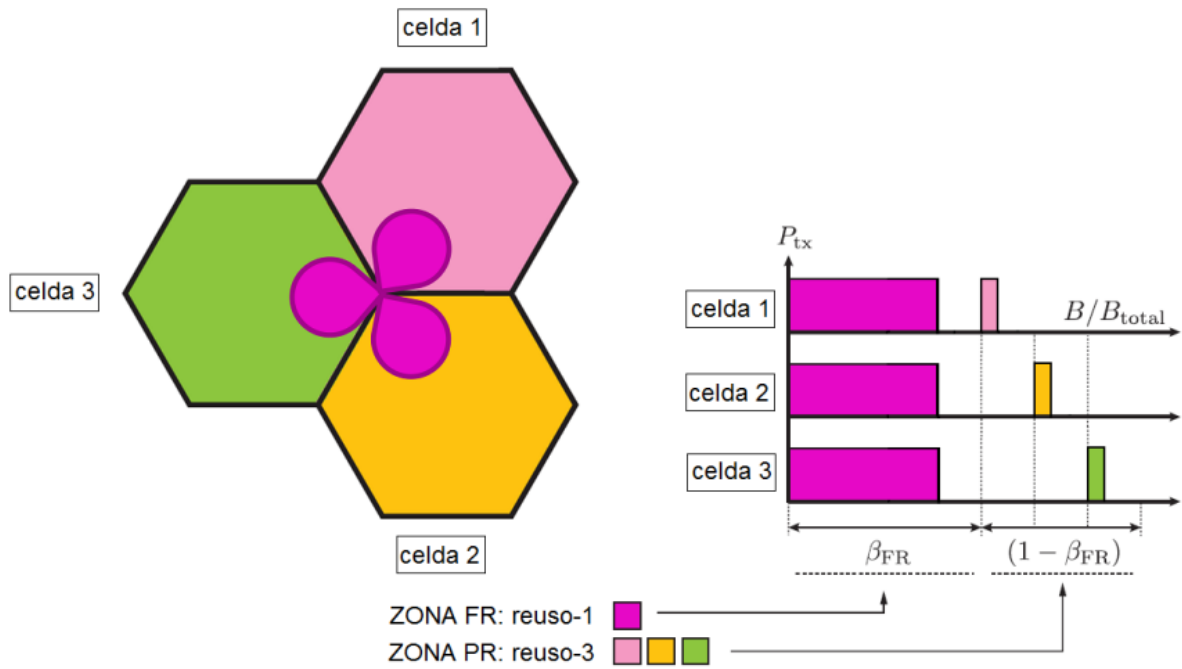


Figura 4.8 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 15$ dB y $\beta_{FR} = 0.75$.

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 15$ dB y $\beta_{FR} = 0.5$

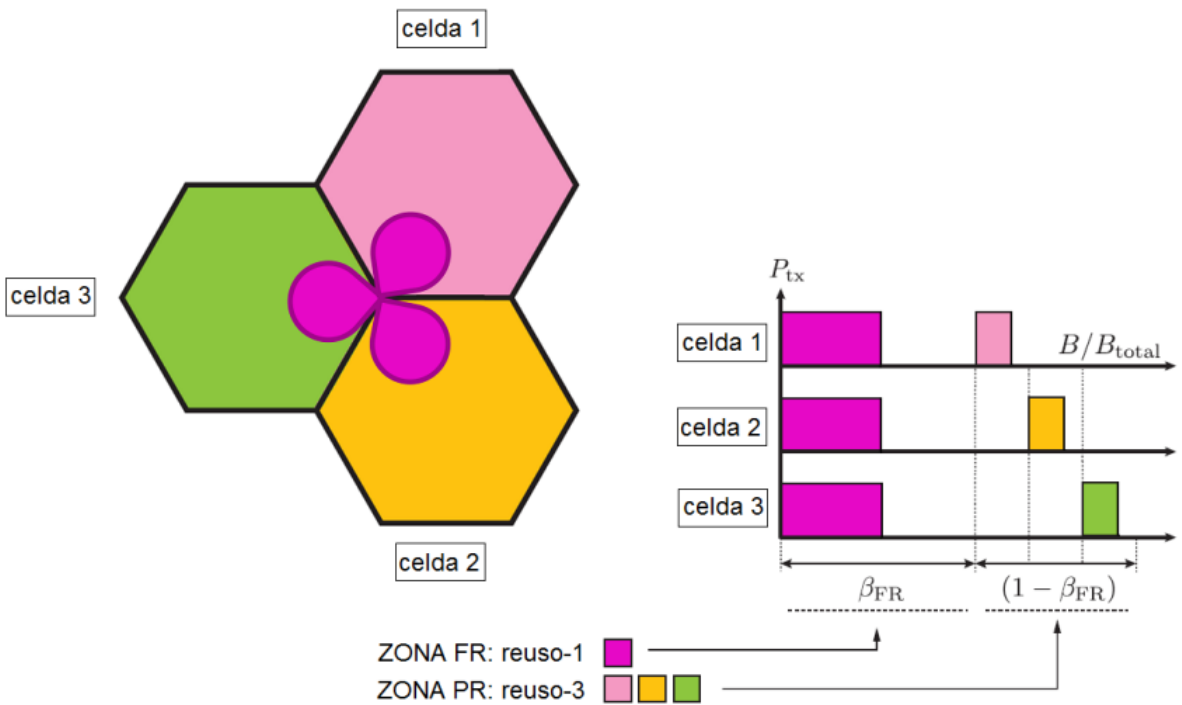


Figura 4.9 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 15$ dB y $\beta_{FR} = 0.5$.

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 15$ dB y $\beta_{FR} = 0.25$

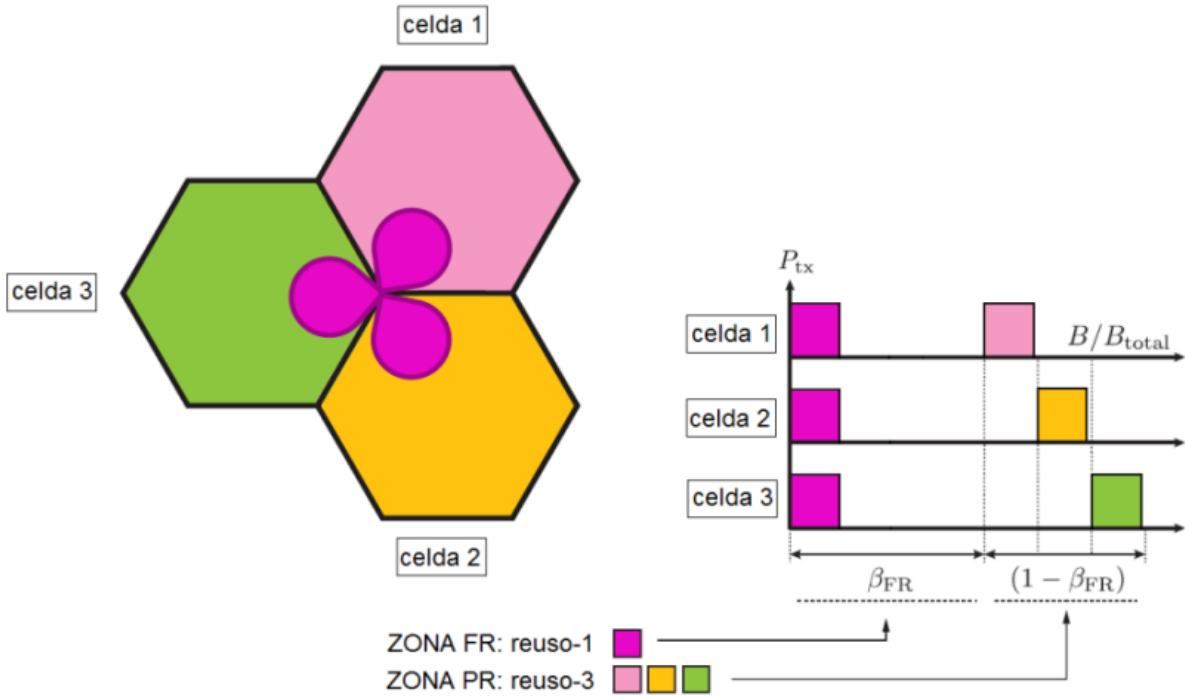


Figura 4.10 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 15$ dB y $\beta_{FR} = 0.25$.

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 15$ dB y $\beta_{FR} = 0.01$

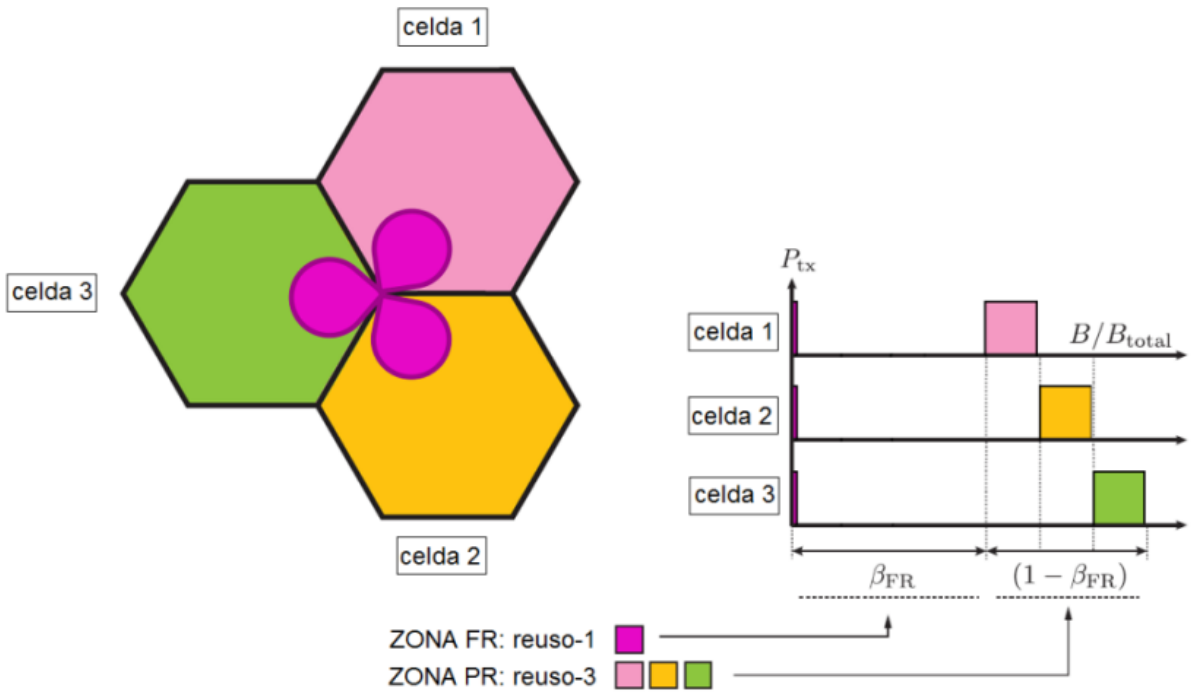


Figura 4. 11 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 15$ dB y $\beta_{FR} = 0.01$.

SINR -2 dB

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = -2$ dB y $\beta_{FR} = 1$

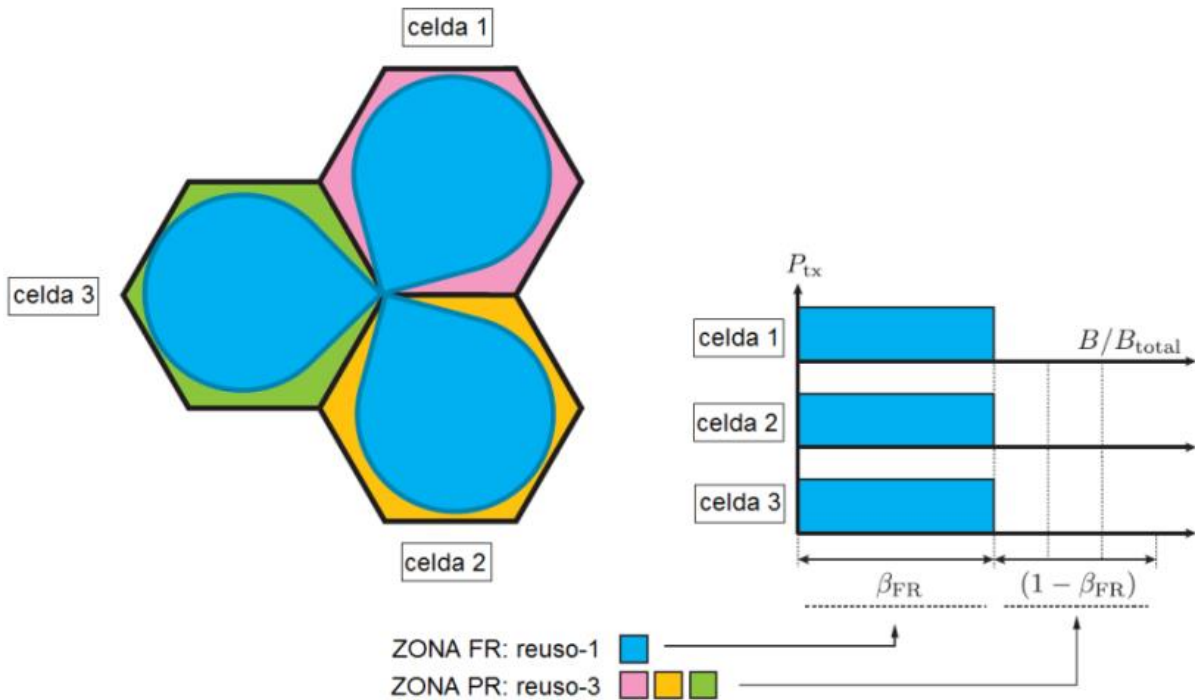


Figura 4.12 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = -2$ dB y $\beta_{FR} = 1$.

En la Figura 4.12 se muestra el escenario de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) para SINR -2dB y $\beta_{FR}=1$, considerado como el esquema de reuso 1, debido a que abarca la mayoría o totalidad de la celda, empleando todo el Ancho de Banda (BW) existente en esta zona.

En el ANEXO B se presentan los demás escenarios para el umbral de SINR -2 dB, donde se especifica cuál es el esquema para cada variación del Ancho de Banda (BW).

SINR 22.5 dB

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 22.5$ dB y $\beta_{FR} = 0.01$

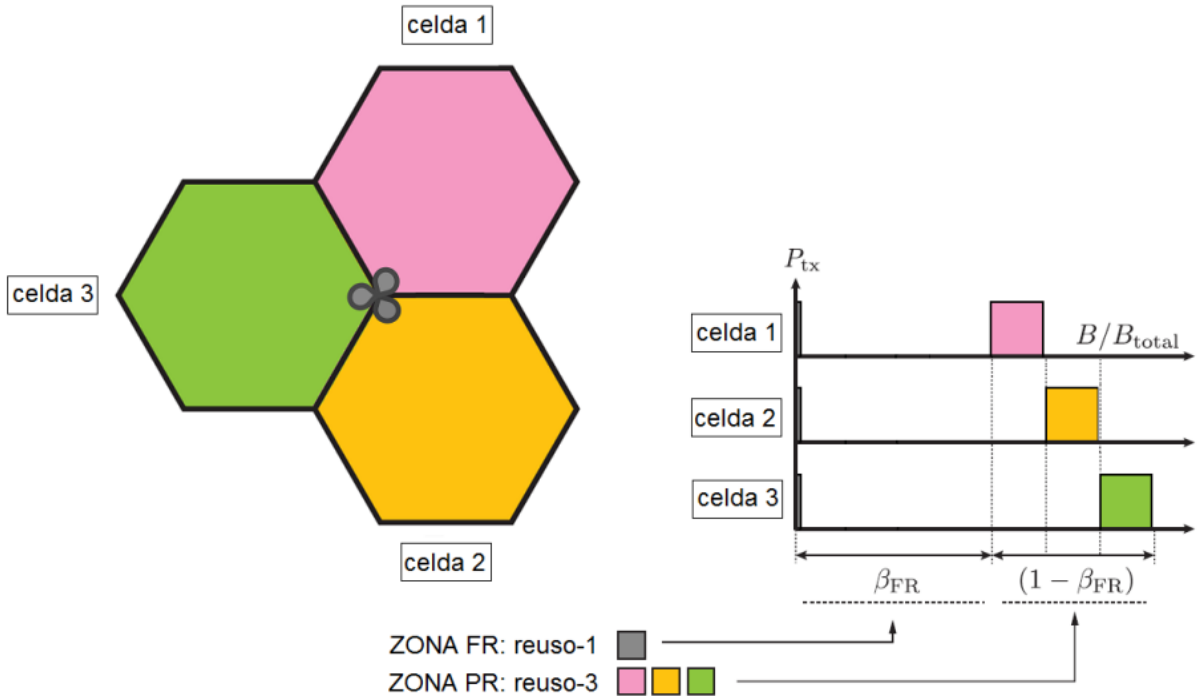


Figura 4.13 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 22.5$ dB y $\beta_{FR} = 0.01$.

En la Figura 4.13 se muestra el esquema FFR para SINR 22.5dB y $\beta_{FR}=0.01$, considerado como el esquema de reuso 3, debido a que la zona borde abarca la mayoría o totalidad de la celda, empleando casi todo el Ancho de Banda (BW) existente en esta zona con un reuso cíclico de 3 .

En el ANEXO B se muestran los demás escenarios para el umbral de SINR 22.5 dB, donde se especifica cuál es el esquema con cada variación del Ancho de Banda (BW).

Así mismo los escenarios para los umbrales de SINR 10dB y SINR 5dB son claramente detallados en el ANEXO B.



4.4 EVALUACIÓN DE LAS CONFIGURACIONES DE FFR

En esta sección se evalúa el desempeño de un Equipo de Usuario (UE) bajo diferentes combinaciones de β_{FR} y Γ_{thr} ; mostrando como resultado los valores del *Throughput* alcanzados en cada configuración.

La evaluación del *Throughput* de un sistema LTE empleando Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) se realiza por medio de Indicadores Claves de Desempeño (KPI, *Key Performance Indicators*), más conocidos como: *Throughput* Medio, Borde y Pico [20]. Estos indicadores se derivan de la Función de Probabilidad Acumulada Empírica (ECDF, *Empirical Cumulative Distribution Function*) en el *Throughput* y de acuerdo a la literatura, el indicador *Throughput* Borde es el resultado de emplear el 5% de los puntos de la ECDF y el *Throughput* Pico de emplear el 95%, lo anterior se interpreta como el desempeño de un Equipo de Usuario en el límite y en el centro de la celda, respectivamente [21].

En la Figura 4.14, se muestran de izquierda a derecha, los resultados del *Throughput* Medio y la ganancia del *Throughput* Medio alcanzado por un Equipo de Usuario (UE) empleando Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) y el algoritmo de planificación *Proportional Fair*. De igual forma, los resultados del *Throughput* Pico y *Throughput* Borde con sus correspondientes ganancias, se exponen en las Figuras 4.15 y 4.16, respectivamente.

Para la obtención de estas gráficas, se variaron los parámetros β_{FR} en el eje x y Γ_{thr} en el eje y. Cada punto de color representa el nivel de *Throughput* (Gráfica de la izquierda) y la ganancia del *Throughput* (Gráfica de la derecha), experimentado por un Equipo de Usuario (UE) en determinada zona de la celda. En la escala de colores, los colores rojo indica el máximo *Throughput* o ganancia alcanzada, los colores amarillos y verdes señalan los valores medios alcanzados y los colores azules indican los valores mínimo que logra el sistema.

Si el usuario se encuentra en la zona centro de la celda (Figura 4.15), el máximo *Throughput* Pico que experimentara será de 25 Mbps para una configuración de Γ_{thr} entre 22.5 dB y 18 dB con β_{FR} entre 1 y 0.9, lo cual corresponde a una ganancia del 700% respecto a un sistema sin reuso. Si el usuario se ubica en la zona límite de celda (Figura 4.16), el máximo *Throughput* borde que lograra será de 0.7 Mbps (Γ_{thr} entre 10 dB y 15 dB con β_{FR} entre 0.30 y 0.25), equivalente a una ganancia del 45%. Por otra parte, se observa en la Figura 4.14, que el máximo *Throughput* Medio que alcanzara el sistema empleando el esquema de reuso fraccional será de 2.5 Mbps, para Γ_{thr} entre 20 dB y 15 dB con β_{FR} entre 1 y 0.9, lo cual es semejante a una ganancia del 60%.

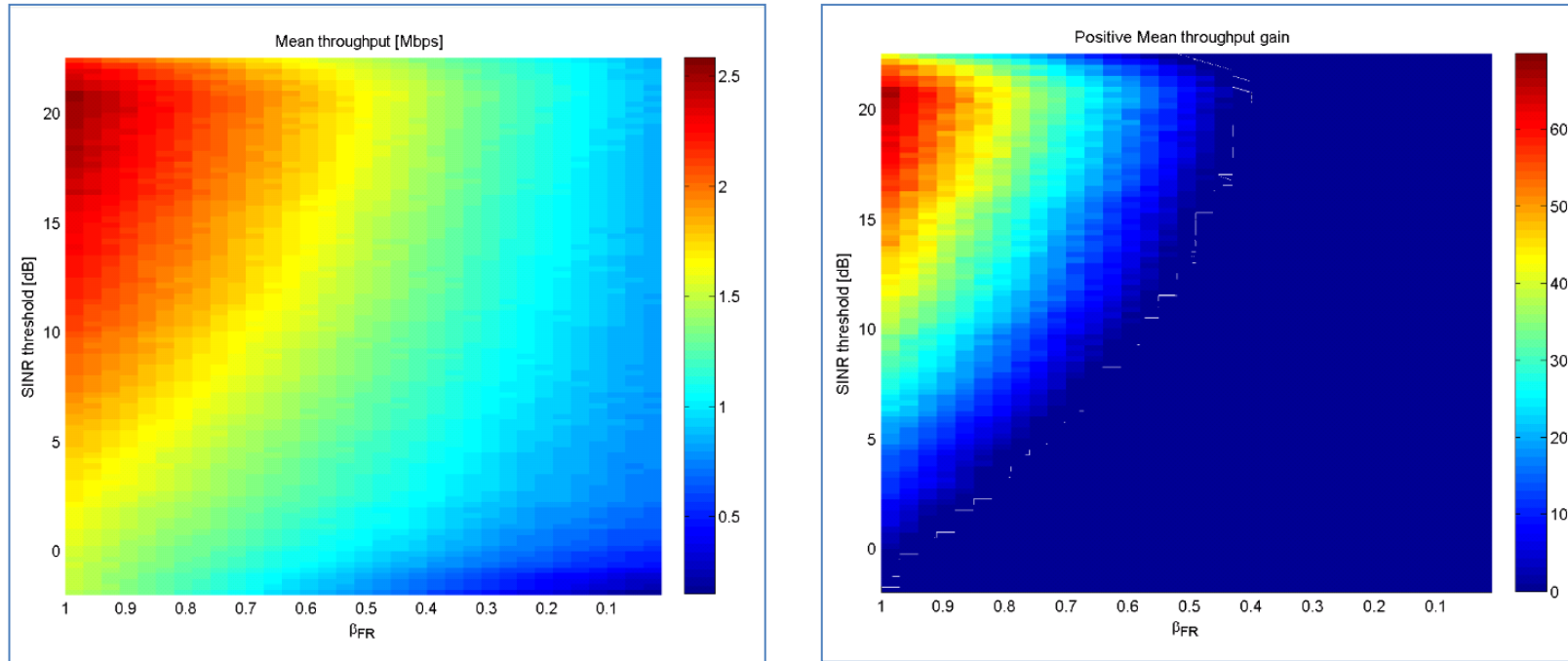


Figura 4.14 Resultados de Simulación del *Throughput* Medio (Mbps) y Ganancia del *Throughput* Medio (%) para un Sistema LTE con FFR y *Proportional Fair*.

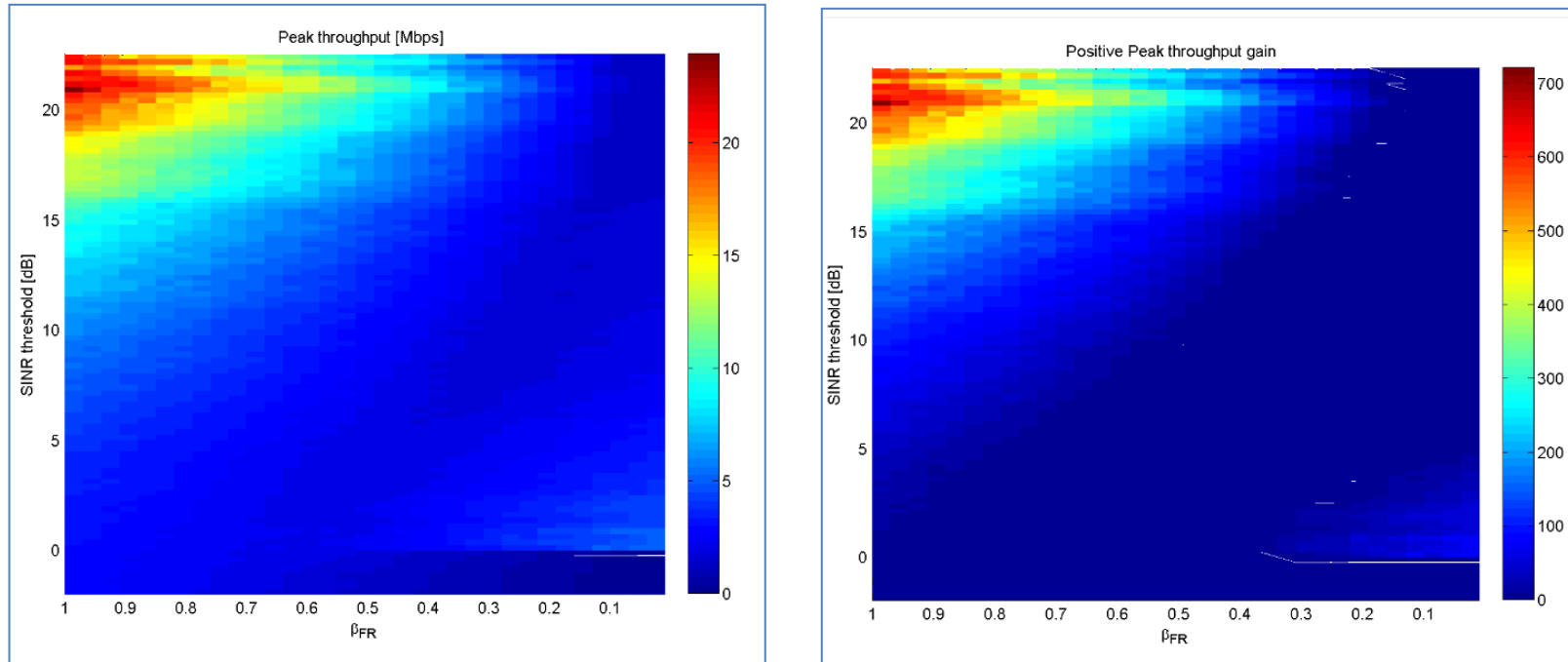


Figura 4.15 Resultados de Simulación del *Throughput* Pico (Mbps) y Ganancia del *Throughput* Pico (%) para un Sistema LTE con FFR y *Proportional Fair*.

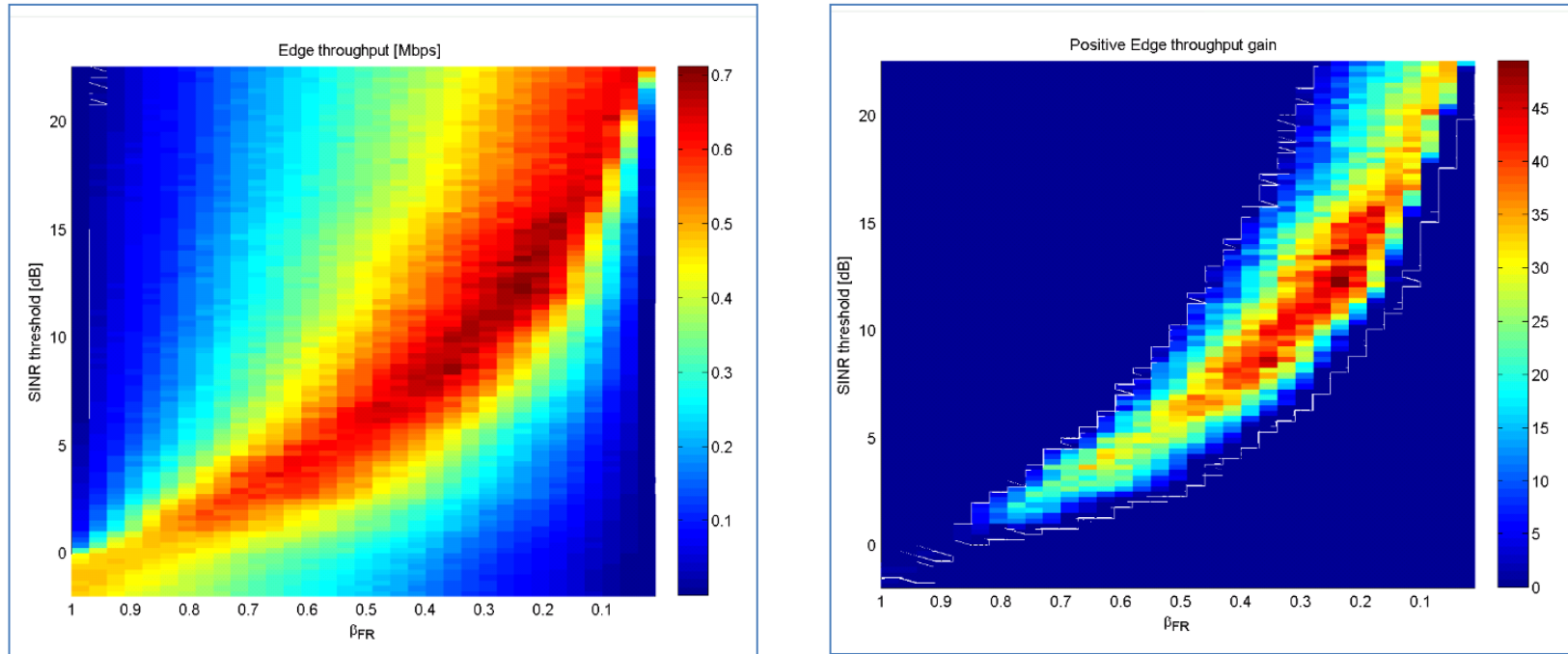


Figura 4.16 Resultados de Simulación del *Throughput* Borde (Mbps) y Ganancia del *Throughput* Borde (%) para un Sistema LTE con FFR y *Proportional Fair*.



A modo de ejemplo, si se configura el esquema de reuso con $\beta_{FR} = 0.30$ y $\Gamma_{thr} = 10$ dB, se obtienen los siguientes resultados de desempeño de un Equipo de Usuario (UE):

- *Throughput* Medio igual a 1.3 Mbps, equivalente a una ganancia del 5% en relación con el reuso 1 (ver Figura 4.14).
- *Throughput* Pico igual a 4 Mbps similar al 70% de ganancia (ver Figura 4.15).
- *Throughput* Borde igual a 0.7 Mbps, semejante al 45% de ganancia (ver Figura 4.16).

Lo anterior indica que independientemente de la configuración de Γ_{thr} y β_{FR} , los Equipos de Usuario (UE) del centro de la celda siempre experimentarían mejores velocidades de transmisión de datos, debido a que las pérdidas de trayecto son menores en relación con las pérdidas de los Equipos de Usuarios (UE) situados en el borde. Por esta razón, es de mayor importancia establecer para que valores de Γ_{thr} y β_{FR} se obtiene el mejor desempeño en los usuarios del borde empleando la técnica de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR).

En las Figura 4.17, 4.18 y 4.19, se muestran los resultados anteriormente explicados, para el algoritmo de planificación *Round Robin*.

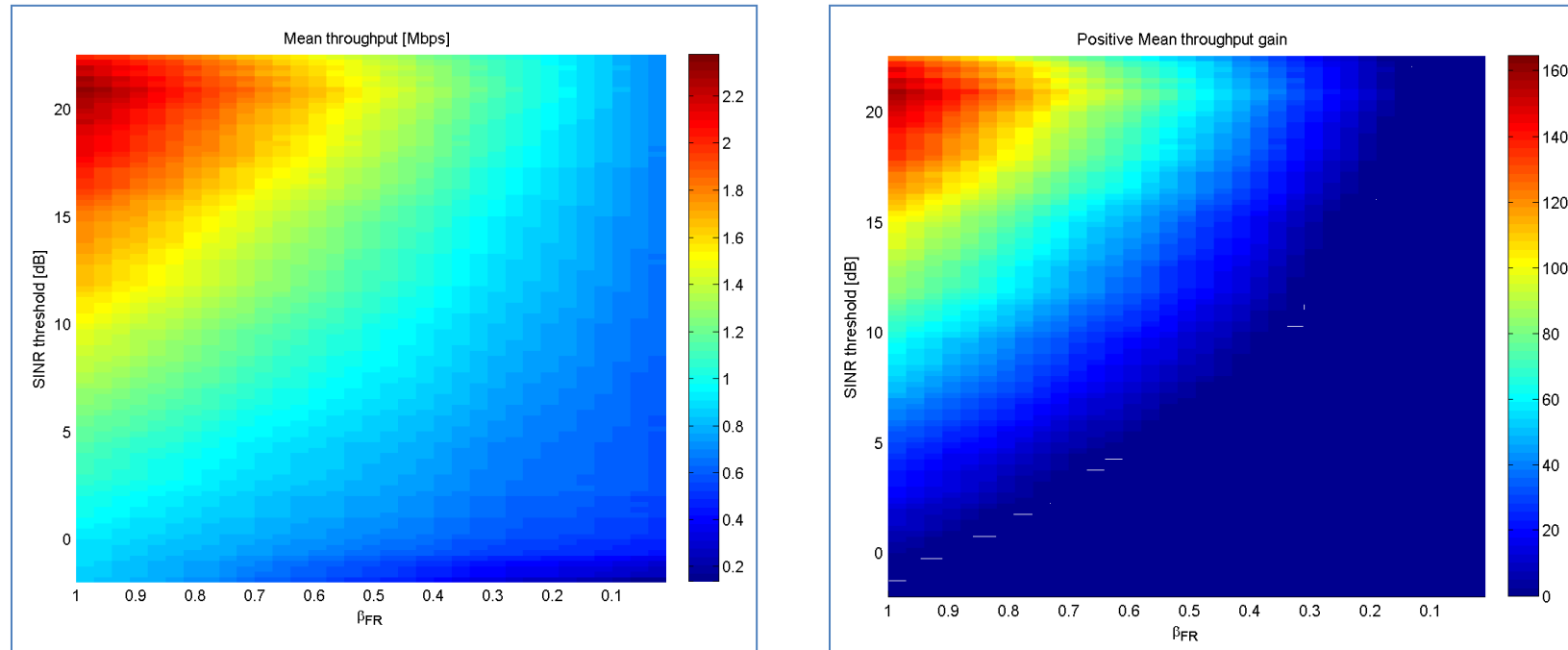


Figura 4.17 Resultados de Simulación del *Throughput* Medio (Mbps) y Ganancia del *Throughput* Medio (%) para un Sistema LTE con FFR y *Round Robin*.

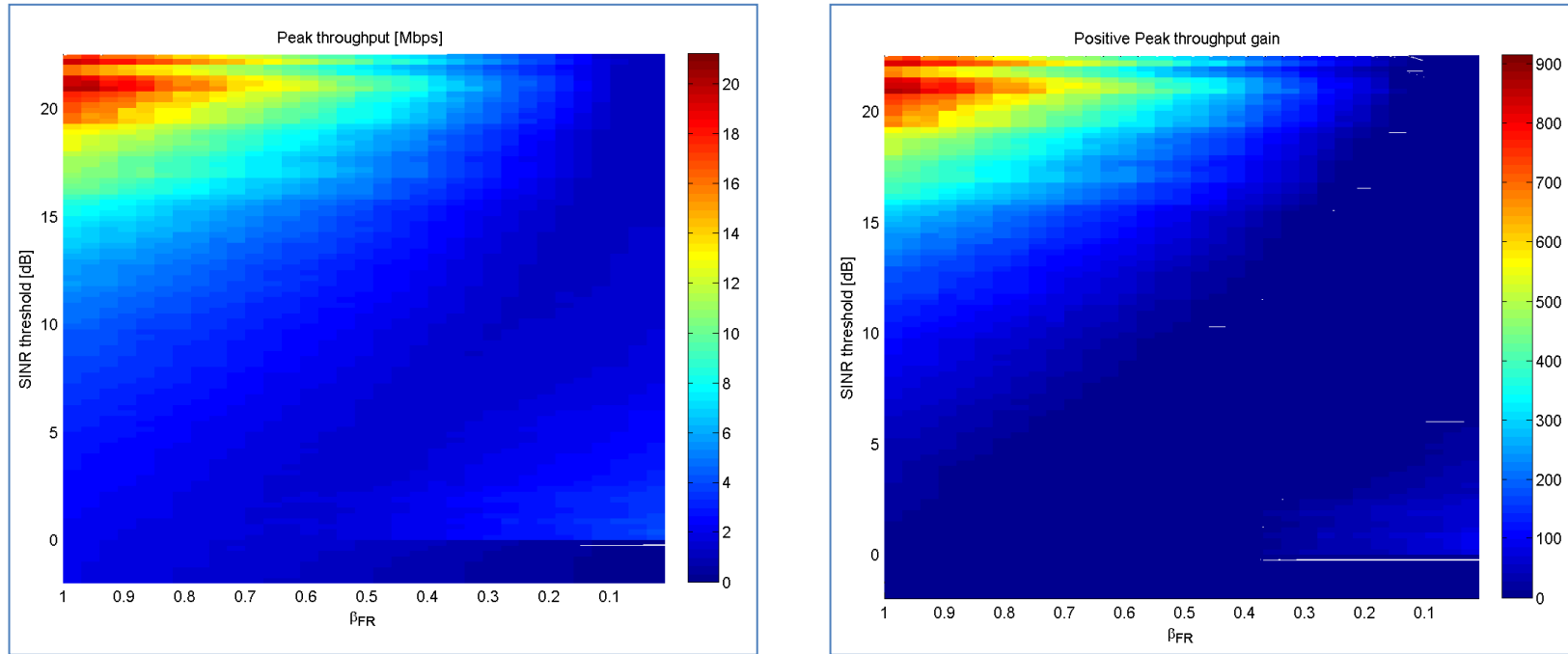


Figura 4.18 Resultados de Simulación del *Throughput* Pico (Mbps) y Ganancia del *Throughput* Pico (%) para un Sistema LTE con FFR y *Round Robin*

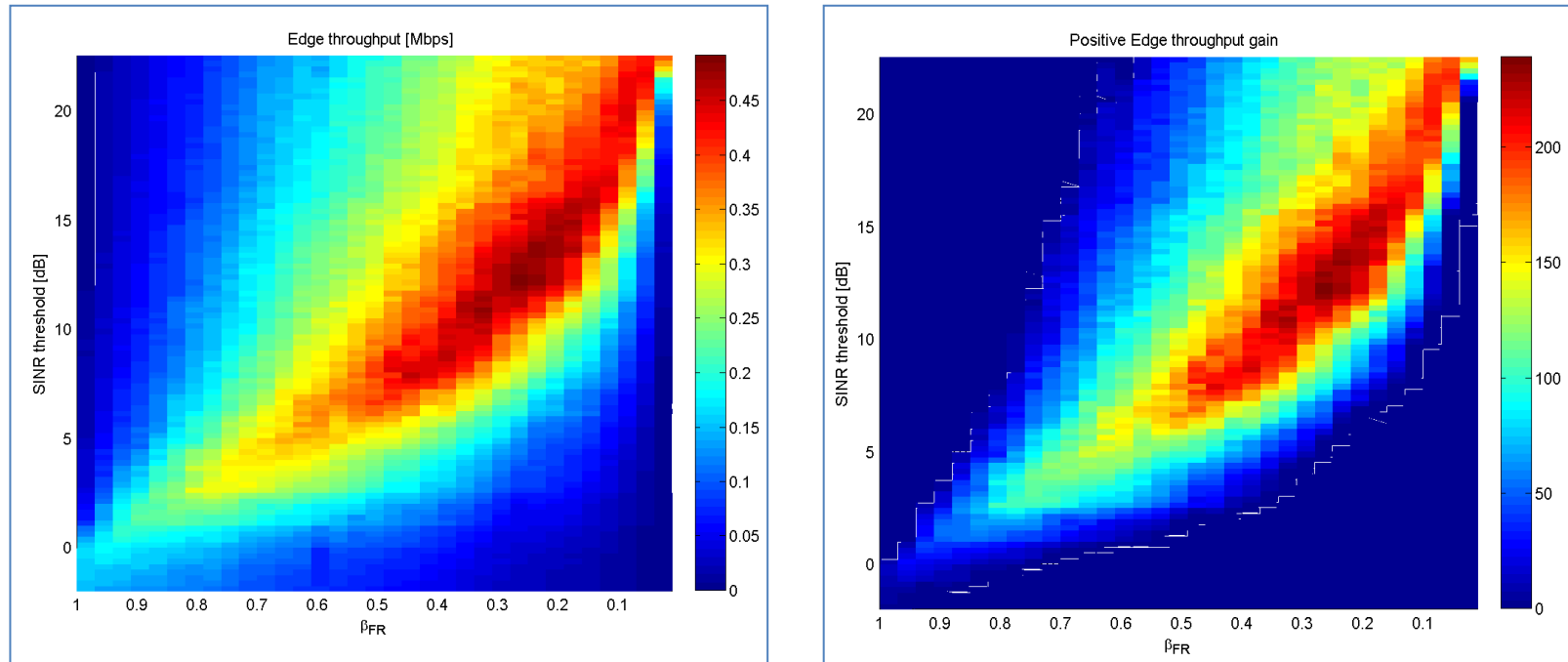


Figura 4.19 Resultados de Simulación del *Throughput* Borde (Mbps) y Ganancia del *Throughput* Borde (%) para un Sistema LTE con FFR y *Round Robin*.



4.5 EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD

Con el fin de evaluar la capacidad de un sistema LTE al emplear la técnica de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) en los siguientes resultados se encuentra la distribución de *Throughput* y Eficiencia Espectral en función de la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) para los Equipos de Usuario (UE) de un sistema LTE y los diferentes esquemas de reuso. Estos resultados se presentan de dos formas:

- En ECDF.
- En diagramas de dispersión

Las ECDF se pueden observar en la Figura 4.20, que contiene los resultados de *Throughput* y Eficiencia Espectral para el escenario con $\Gamma_{thr} = 10$ dB y $\beta_{FR} = 0.75$. A la izquierda, la $F(x)$ que representa la ECDF, está en función del *Throughput* medio de los UEs [Mb/s] e indica el porcentaje de usuarios que experimentan ciertos niveles de *Throughput*. Del mismo modo, a la derecha se encuentra la $F(x)$ en función de la Eficiencia espectral media de los UEs [bit/cu]¹³.

Por ejemplo, la curva del lado izquierdo señala que más o menos el 58% de los usuarios tienen bajos niveles de *Throughput*, sin embargo el otro 42% al tener niveles más altos impulsan a que el *Throughput* medio de la celda aumente y genere ganancia en comparación con un sistema sin reuso.

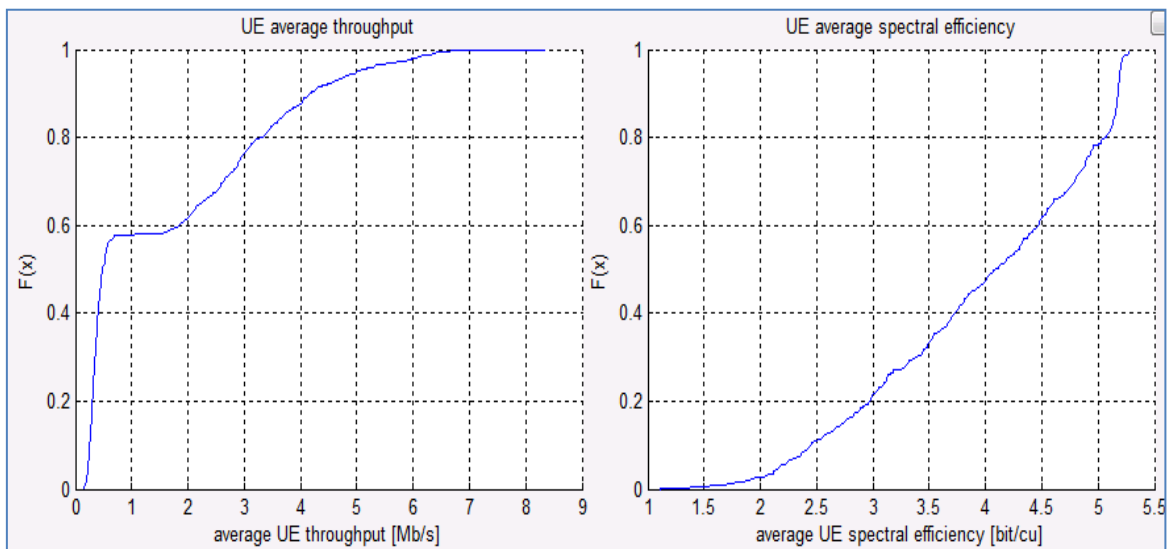


Figura 4.20 ECDF.

¹³ [bit/cu] = $\frac{bit}{Channel\ use}$



Los diagramas de dispersión se presentan en la Figura 4.21, donde se observa que en $\Gamma_{thr} = 10$ dB, se delimita la Zona de Reuso Completo (FR) y la Zona de Reuso Parcial (PR). A la izquierda, se puede ver que a pesar de emplear la técnica de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR), los Equipos de Usuario (UE) de la Zona PR presentan niveles de *Throughput* promedio muy bajos en relación con los de la Zona FR, por lo que es de gran importancia establecer el escenario para el cual la técnica muestra los mejores resultados de *Throughput* y eficiencia espectral.

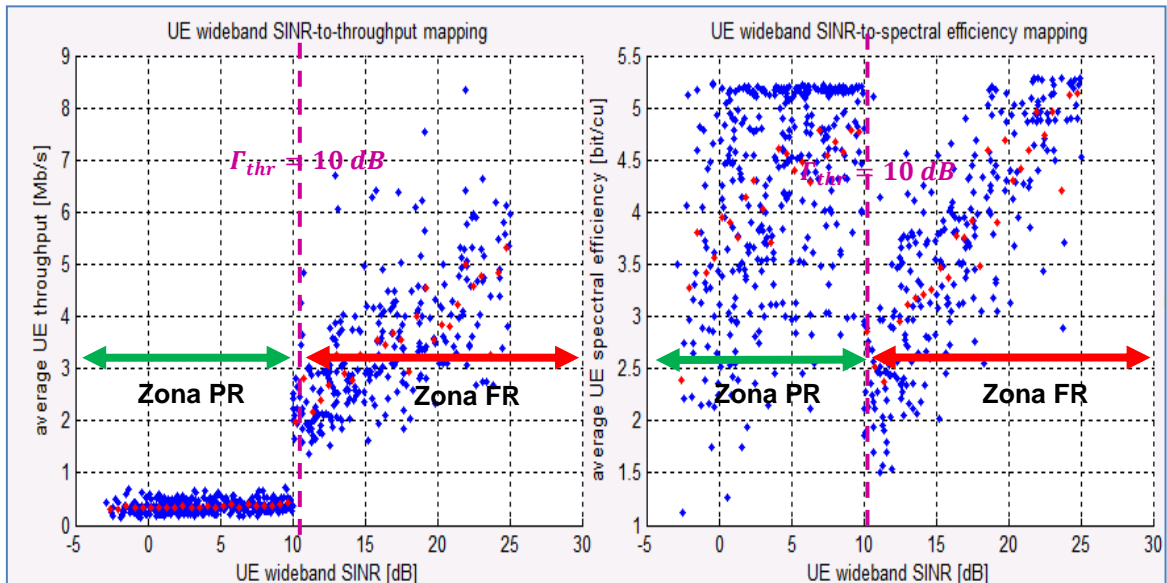


Figura 4.21 Diagramas de Dispersión.

Para establecer el mejor escenario, se eligieron 6 configuraciones, 4 de ellas muestran el mejor comportamiento de la técnica de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) y las otras 2 representan los escenarios con y sin reuso de frecuencia de un sistema LTE, como se aprecia en la Tabla 4.3. Los resultados para los demás escenarios se pueden encontrar en el ANEXO C.

Tipo de Reuso	SINR Umbral, Γ_{thr} (dB)	β_{FR}
Reuso 1	-2	1
Reuso 3	22.5	0.01
FFR	10	0.50
		0.30
		0.25
		0.25
	15	0.25

Tabla 4.3 Escenarios de Prueba para Análisis de Capacidad.



- **Proportional Fair.**

Reuso 1

La Figura 4.22 muestra los resultados de *Throughput* y la eficiencia espectral del reuso igual a 1 ($\Gamma_{thr}=-2$ dB para $\beta_{FR}=1$). Los puntos rojos de los diagrama de dispersión indican que la tendencia de las gráficas es lineal, es decir que el *Throughput* y la eficiencia espectral crecen de forma proporcional a la SINR. Como se puede observar, el *Throughput* puede alcanzar valores entre 3 Mbps y 4 Mbps y la eficiencia espectral entre 5 bit/cu y 6 bit/cu, para un rango de SINR entre 20 dB y 25 dB. Sin embargo, este escenario al considerar prácticamente a toda la celda como zona FR y asignarle todos los recursos radio, provoca que los terminales con SINR baja, presenten niveles de *Throughput* y eficiencia espectral muy pequeños, empeorando así su desempeño.

Por otra parte, en este escenario las ECDF señalan que aproximadamente el 75% de los Equipos de Usuario (UE) experimentan un nivel de *Throughput* promedio menor a 2 Mbps y un 63% experimentan una eficiencia espectral menor a 3 Bit/cu.

Reuso 3

Los resultados del escenario que representan un sistema LTE con factor de reuso igual 3, se muestran en la Figura 4.23, donde se observa que a diferencia del primer escenario, los diagramas de dispersión presentan una tendencia curvilínea y con valores promedios a 1 Mbps en el *Throughput* y 5 bit/cu en la eficiencia espectral, para los Equipos de Usuarios (UE) de la zona PR. No obstante, a pesar de que esta configuración genera ganancias en el *Throughput* y en la eficiencia espectral a los terminales del límite de la celda, no puede garantizar la calidad del servicio a todos los usuarios dentro de la celda, ya que la distribución del Ancho de Banda (BW) y delimitación de la zona, provoca que los usuarios con SINR alta no tengan suficientes recursos radio, como se observa en la zona FR.

Si se analizan las ECDF, el 60% de los usuarios perciben niveles de *Throughput* entre 0.3 Mbps y 1 Mbps, mientras que solo un 15% experimentan una eficiencia espectral menor a 4 bit/cu.

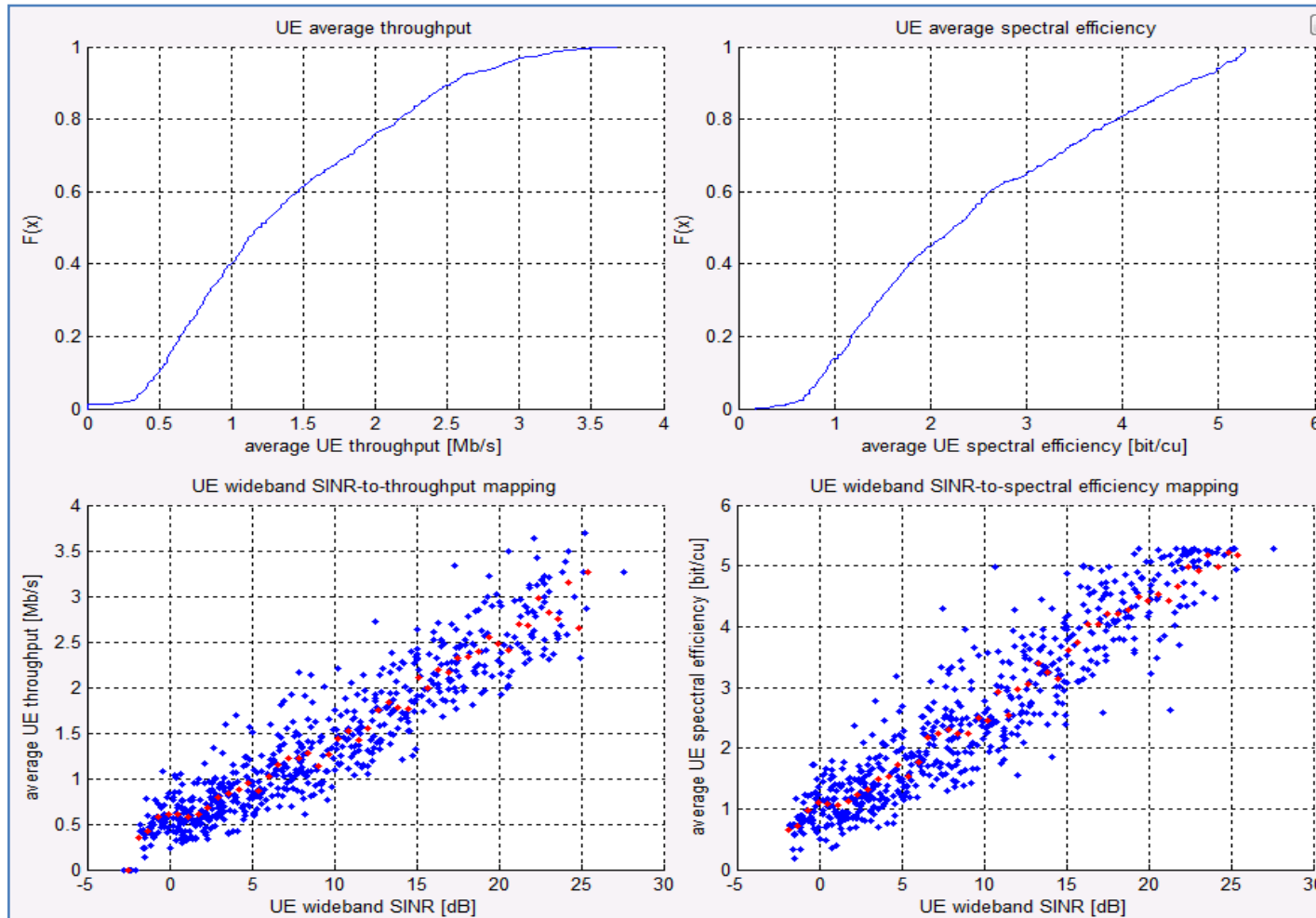


Figura 4.22 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=-2$ dB con $\beta_{FR}=1$.

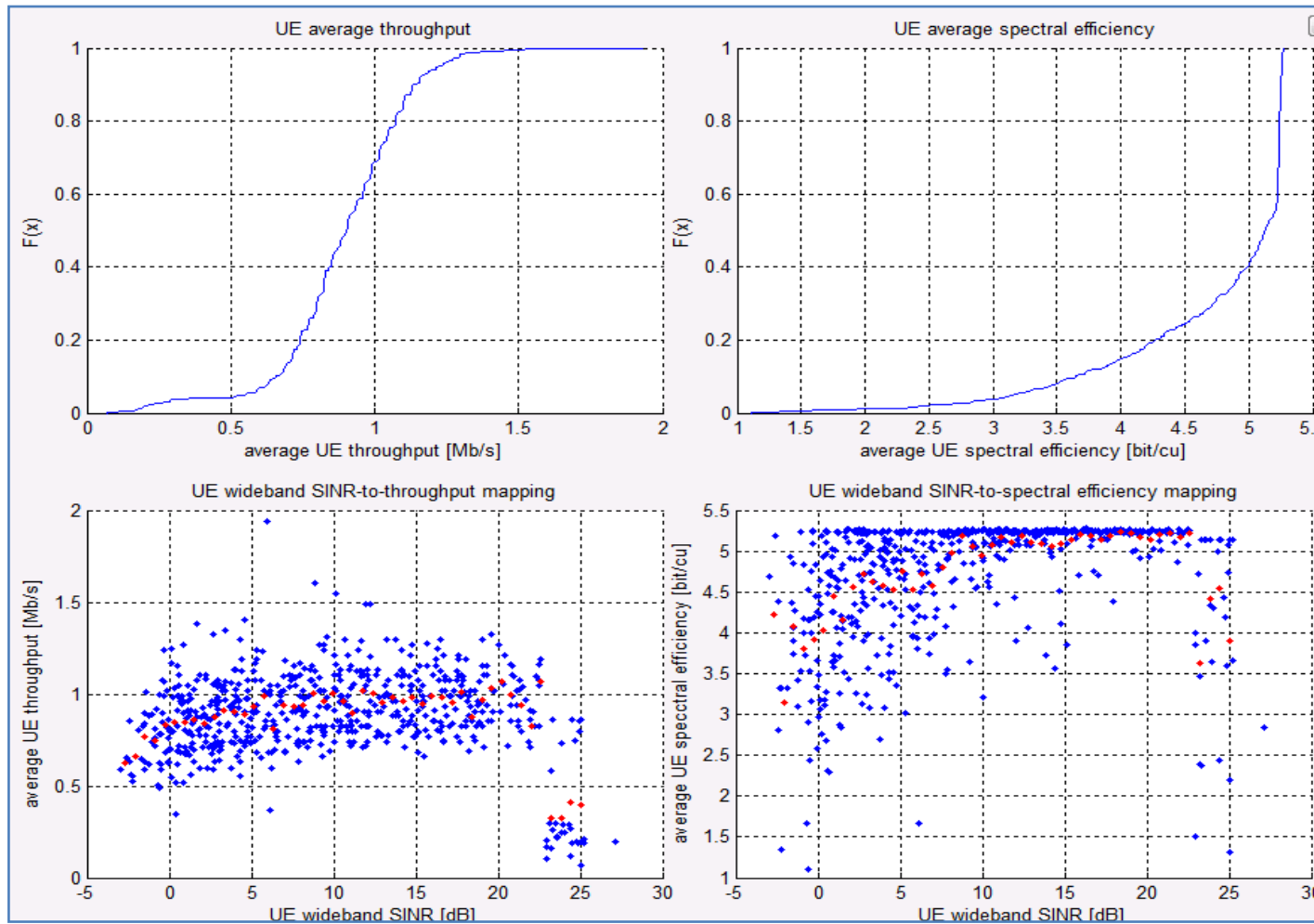


Figura 4.23 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=22.5$ dB con $\beta_{FR}=0.01$.



A continuación en las Figuras 4.24, 4.25, 4.26 y 4.27 se muestran los resultados para $\Gamma_{thr}=10$ dB y $\Gamma_{thr}=15$ dB con diferentes valores de β_{FR} .

La Figura 4.24 exhibe una configuración de $\beta_{FR}=0.5$ que permite la partición equitativa de los recursos radio entre la zona PR y la zona FR. No obstante los Equipos de Usuario (UE) de la zona PR presentan niveles de *Throughput* muy bajos (0.5 Mbps) mientras que los de la zona FR oscilan en un rango de 2 Mbps y 4 Mbps. Cabe resaltar, que la eficiencia espectral expone un comportamiento constante en la zona PR cerca de 5 bit/cu pero en la zona FR es proporcional a la SINR, con valores entre 2 bit/cu y 5 bit/cu. Esta configuración al permitir que el 60% de los Equipos de Usuario (UE) experimenten una eficiencia espectral promedio igual a 4 bit/cu, mejora la eficiencia espectral promedio del sistema en comparación con el reuso de 1. Por otra parte a pesar de que el 60% de los Equipos de Usuario (UE) presentan un *Throughput* promedio bajo, este sigue siendo superior al que pueden experimentar los usuarios en un sistema LTE sin técnica de coordinación de interferencia.

En las Figuras 4.25 y 4.26 se presentan los resultados para $\beta_{FR}=0.30$ y $\beta_{FR}=0.25$. Inicialmente dentro de los escenarios de simulación definidos no estaba incluido el de $\Gamma_{thr}=10$ dB con $\beta_{FR}=0.30$, pero luego de analizar la Figura 4.16 se estableció que el rango donde se generaban los mejores niveles de *Throughput* de la zona borde se encontraban entre $\beta_{FR}=0.35$ y $\beta_{FR}=0.25$, por lo que se decidió incluir esta configuración. Como se puede observar en los dos escenarios, los diagramas de dispersión del *Throughput* exhiben un comportamiento más equitativo tanto para la zona PR como FR, sin embargo al compararlos se determinó que la configuración para $\Gamma_{thr}=10$ con $\beta_{FR}=0.25$ es la mejor, ya que si se observa la tendencia del *Throughput*, esta se mantiene en un rango entre 0.5 Mbps y 1.6 Mbps, con valores mínimos por encima de 0.5 Mbps y máximos por encima de 1.5, además, los Equipos de Usuario (UE) del límite de la celda experimentan un *Throughput* mayor a 1 Mbps, mientras que con $\beta_{FR}=0.30$ se encuentran por debajo de 0.5 Mbps.

Por otra parte, al analizar en ambas configuraciones la ECDF del *Throughput*, se corrobora que en $\Gamma_{thr}=10$ con $\beta_{FR}=0.25$ es el mejor escenario, dado que la probabilidad de que los usuarios alcancen niveles de *Throughput* por encima de 1 Mbps es del 57 %, mientras que para $\beta_{FR}=0.30$ es del 27 %. Además los resultados de la eficiencia espectral, muestran comportamientos similares a los del *Throughput*, donde la probabilidad de que los Equipos de Usuario (UE) alcancen una eficiencia espectral mayor a 3 bit/cu es del 78 % para $\beta_{FR}=0.25$ y del 58 % para $\beta_{FR}=0.30$.

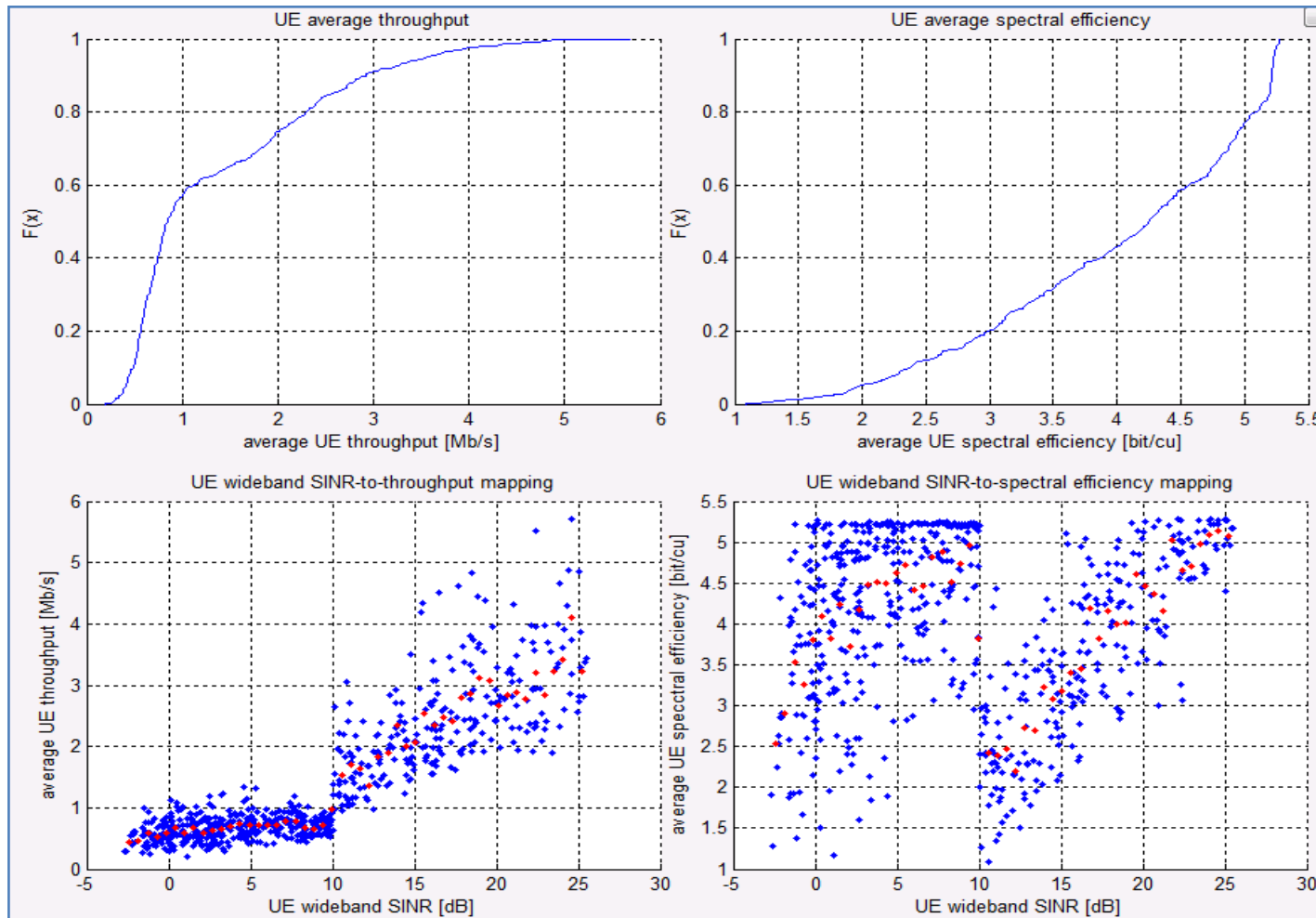


Figura 4.24 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=10$ dB con $\beta_{FR}=0.5$.

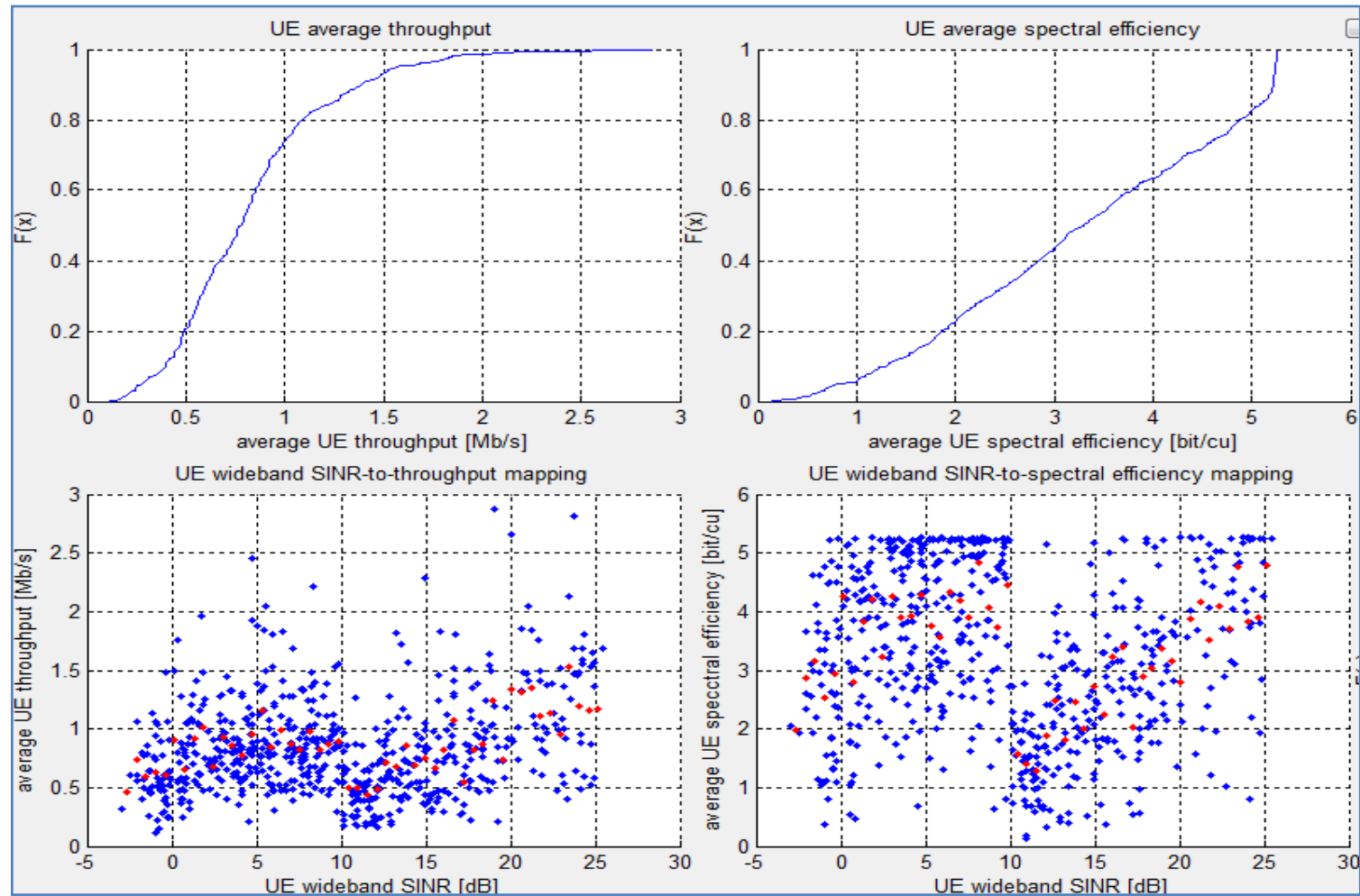


Figura 4.25 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=10$ dB con $\beta_{FR}=0.30$.

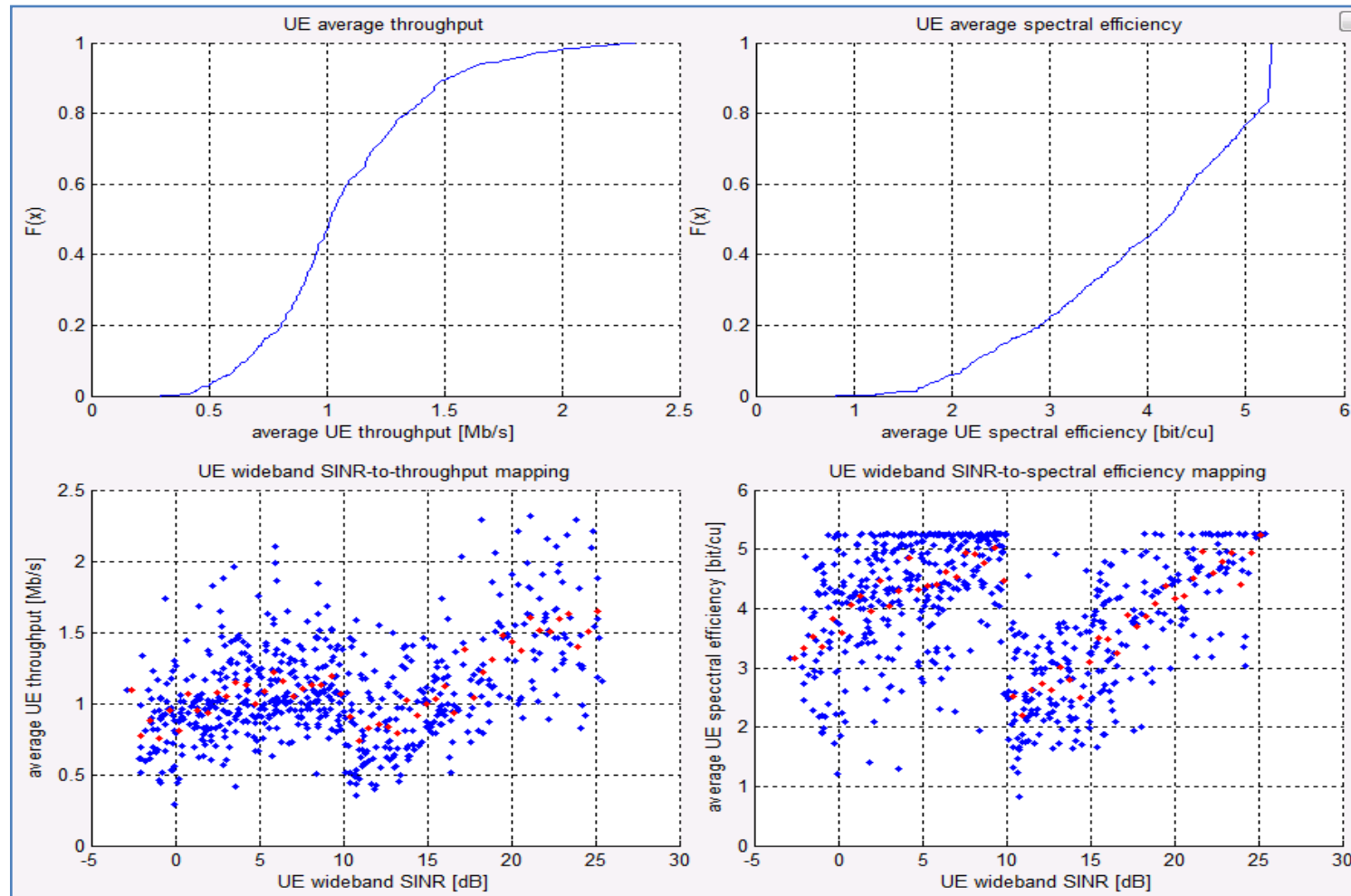


Figura 4.26 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=10$ dB con $\beta_{FR}=0.25$.

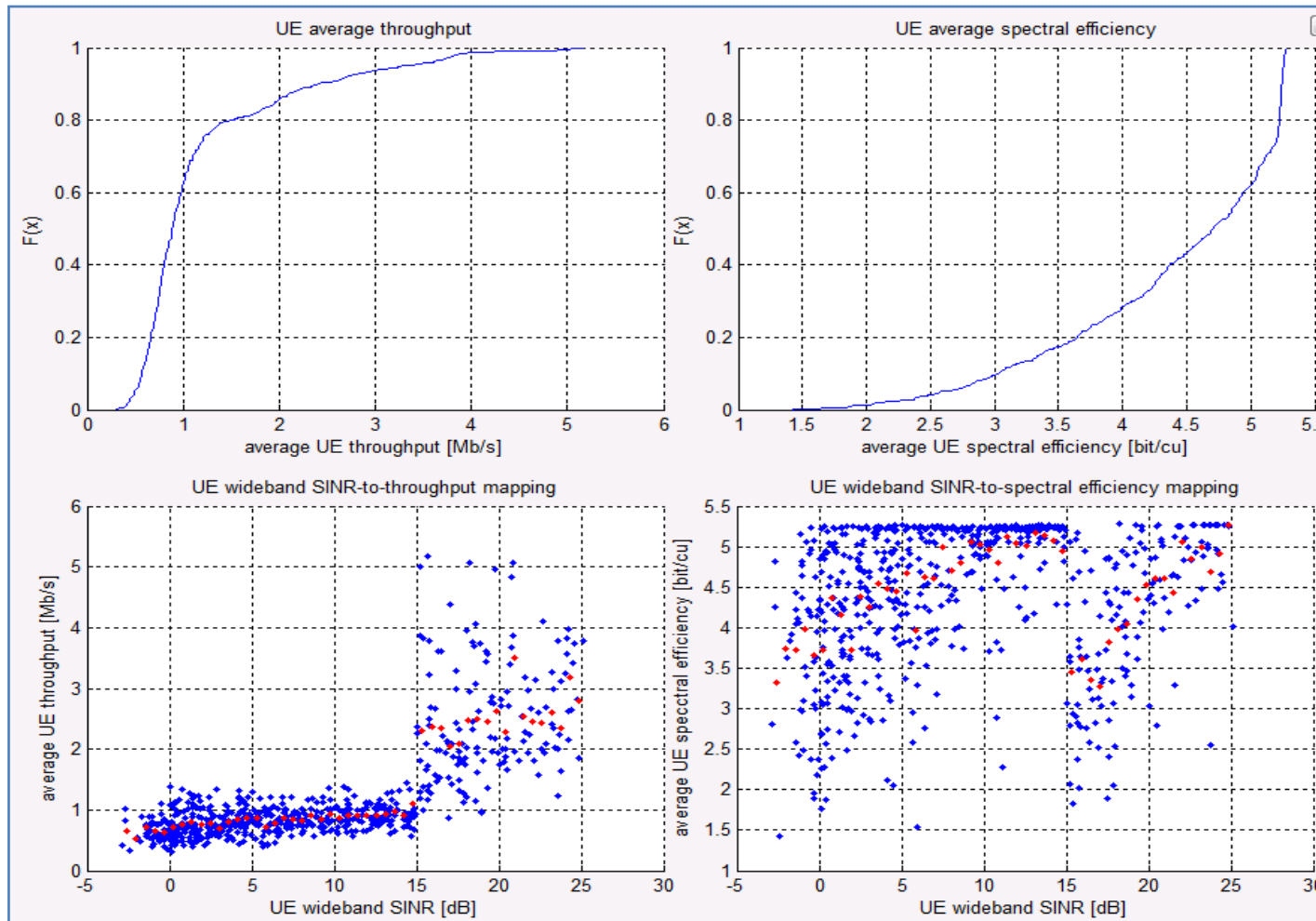


Figura 4.27 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=15$ dB con $\beta_{FR}=0.25$.



Si se comparan los escenarios de $\Gamma_{thr}=10$ dB con $\beta_{FR}=0.25$ y $\Gamma_{thr}=15$ dB con $\beta_{FR}=0.25$ (ver Figuras 4.26 y 4.27), se puede decir que a pesar de que el segundo escenario presenta una mayor asignación de los recursos radio en la zona PR, los niveles de *Throughput* para estos terminales no son significativos frente a los de la zona FR, ya que al tener una menor cantidad de usuarios con buenos niveles de SINR, no requiere de gran cantidad de Ancho de Banda (BW) para obtener un buen desempeño, mientras que los de la zona PR al tener más usuarios con SINR bajos, no disponen de Ancho de Banda (BW) suficiente para brindar un servicio equitativo entre los Equipos de Usuario (UE) de las dos zonas.

- **Round Robin**

En las Figuras 4.28 y 4.29 se presentan los mejores resultados con el algoritmo de planificación *Round Robin*, configurados para $\Gamma_{thr}=10$ dB con $\beta_{FR}=0.25$ en el primer escenario y $\Gamma_{thr}=15$ dB con $\beta_{FR}=0.25$ en el segundo. Al analizar los resultados se determina que el primer escenario es la mejor configuración para el algoritmo *Round Robin* al tener niveles de *Throughput* y eficiencia espectral más altos. Sin embargo, al compararlo con el mejor escenario del planificador *Proportional Fair* (ver Figura 4.26), se comprobó que *Proportional Fair* al asignar los recursos radio de acuerdo a las necesidades de cada usuario, permite tener mayores niveles de *Throughput* y eficiencia espectral que mejoran el desempeño de todos los terminales dentro de la celda.

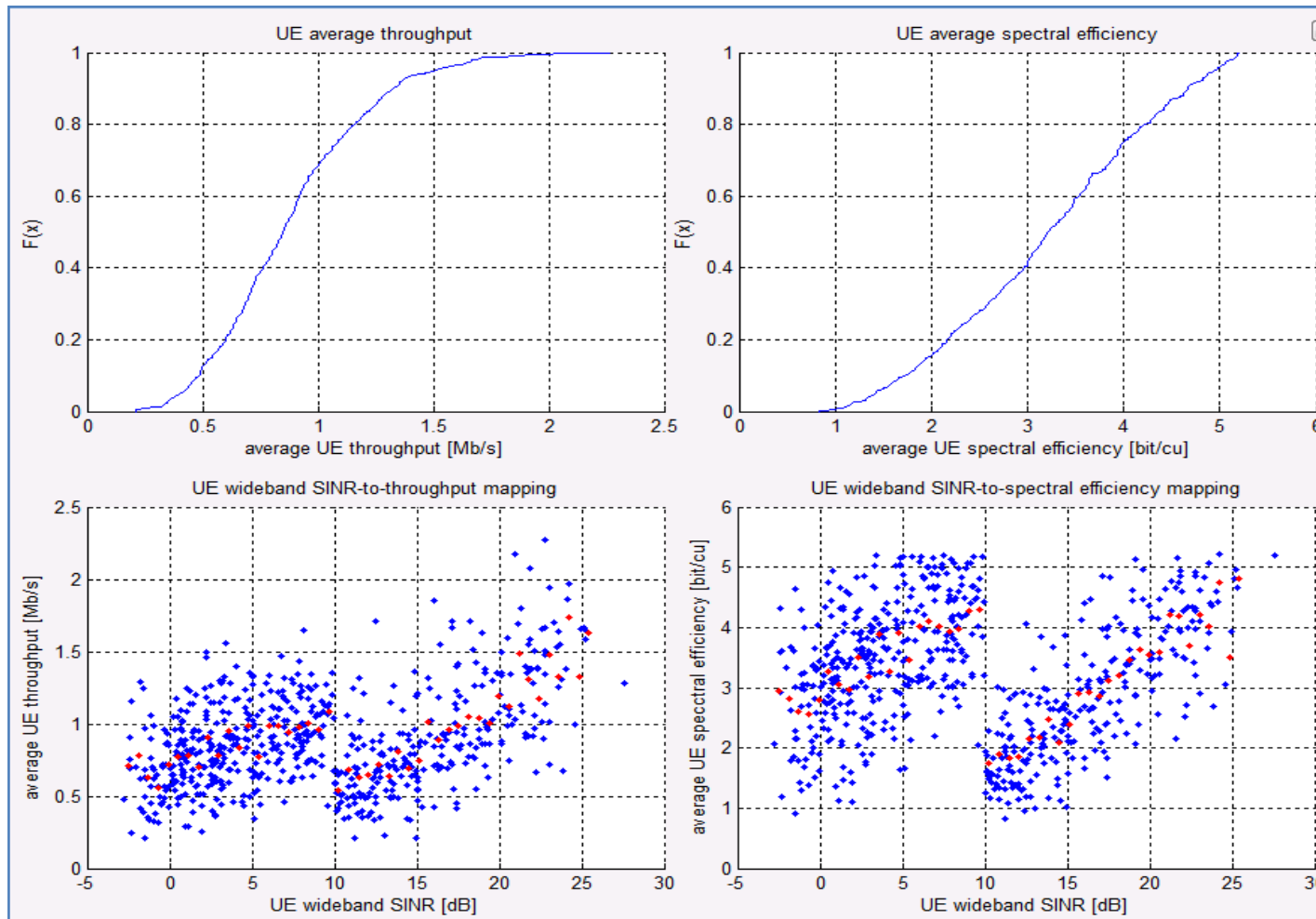


Figura 4.28 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=10$ dB con $\beta_{FR}=0.25$.

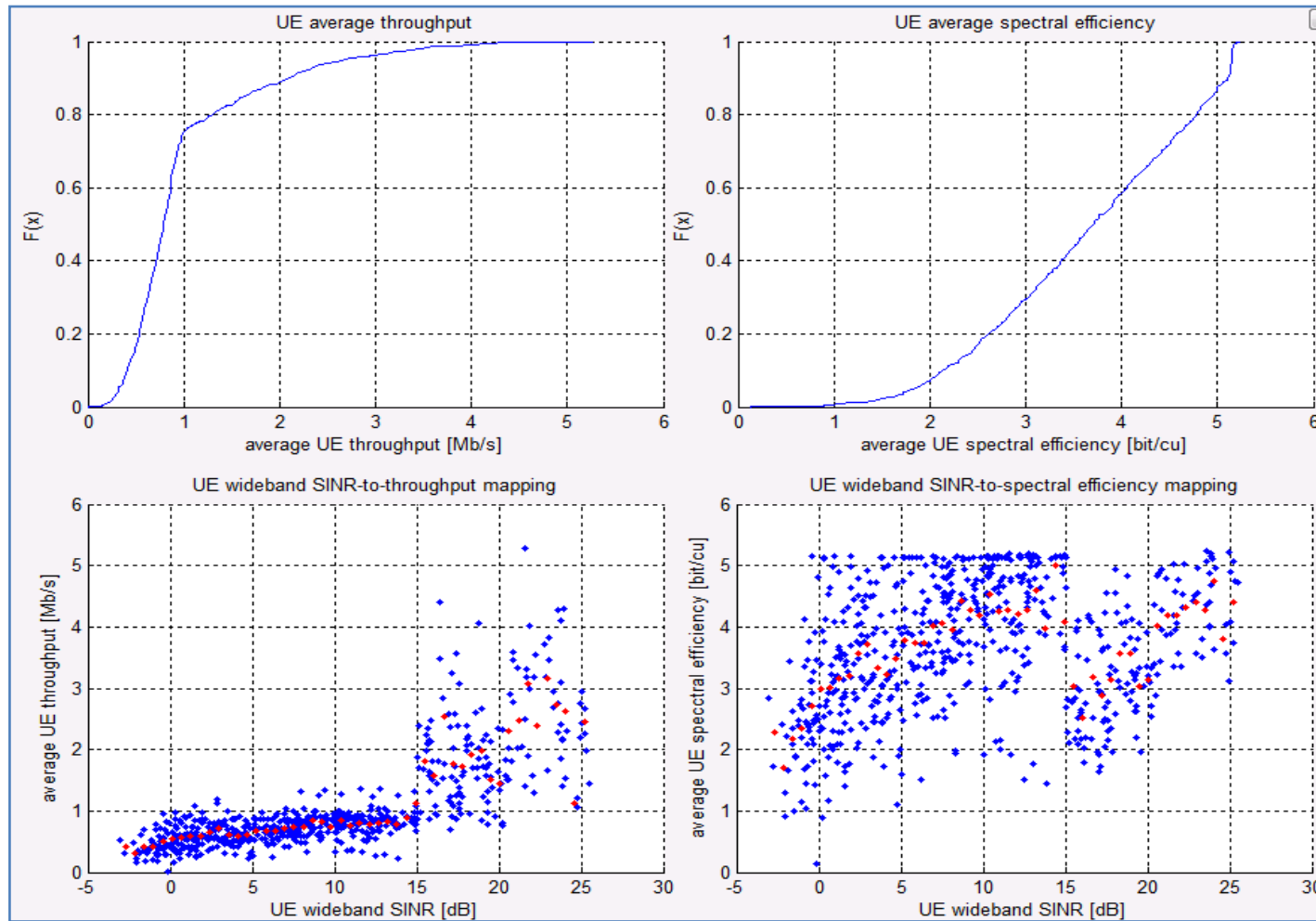


Figura 4.29 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=15$ dB con $\beta_{FR}=0.25$.



4.6 EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DEL *THROUGHPUT* Y LA EFICIENCIA ESPECTRAL

En esta fase se realizaron varias simulaciones siguiendo el método Montecarlo [22], el cual consiste en ejecutar repetidamente la simulación de un escenario cuantas veces sea necesario para obtener una aproximación estadística de dicha muestra, con base en los resultados obtenidos, se puede analizar el comportamiento del sistema para cada escenario, conocer el nivel de Interferencia Inter-Celda (ICI), identificar los beneficios de emplear la técnica de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) y determinar cuál es el mejor escenario en cuanto a capacidad y eficiencia espectral.

Para este trabajo de grado se realizaron diferentes simulaciones y con base en ellas se analizaron los posibles escenarios a considerar y las capacidades computacionales del simulador y del equipo de trabajo, con lo cual, se definió que 63000 ejecuciones eran el valor límite para permitir que el equipo trabajara normalmente sin suspenderse o emplear tiempos excesivos de simulación. Las 63000 simulaciones se obtienen de repetir 100 veces un escenario de simulación con 21 celdas y 30 usuarios por cada una, lo cual lo hace una muestra suficientemente grande para obtener una tendencia estadística del escenario.

Para este sistema estocástico se emplearon los escenarios de prueba que se muestran en la Tabla 4.4 con el fin de analizar estadísticamente el *Throughput* y la eficiencia espectral y por ende la Interferencia Inter-Celda (ICI), de tal forma que se pueda observar cual es el comportamiento de la red con y sin la técnica de mitigación.

Tipo de Reuso	SINR Umbral, Γ_{thr} (dB)	β_{FR}
Reuso 1	-2	1
Reuso 3	22.5	0.01
FFR	10	0.25
		0.30
		0.50
		0.75
	15	0.25
		0.50
		0.75

Tabla 4.4 Escenarios de prueba más representativos.



Las Tablas 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 presentan los cálculos probabilísticos de las 63000 simulaciones de cada escenario para los planificadores *Round Robin* y *Proportional Fair*, en donde se observan los valores de la media y desviación estándar de cada uno de ellos.

- **Proportional Fair**

THROUGHPUT [Mb/s]		
ESCENARIO	PROMEDIO	DESV ESTANDAR
REUSO 1	1,07796372	1,16247138
REUSO 3	0,73378522	0,524423369
FFR	SINR= 10, $\beta_{FR}=0.25$	0,81646531
	SINR= 10, $\beta_{FR}=0.30$	0,78464653
	SINR= 10, $\beta_{FR}=0.50$	1,01341605
	SINR= 10, $\beta_{FR}=0.75$	1,25294785
	SINR= 15, $\beta_{FR}=0.25$	0,88679546
	SINR= 15, $\beta_{FR}=0.50$	1,16595773
	SINR= 15, $\beta_{FR}=0.75$	1,51616762

Tabla 4.5 Valores de media y desviación estándar del *Throughput* para cada escenario con *Proportional Fair*.

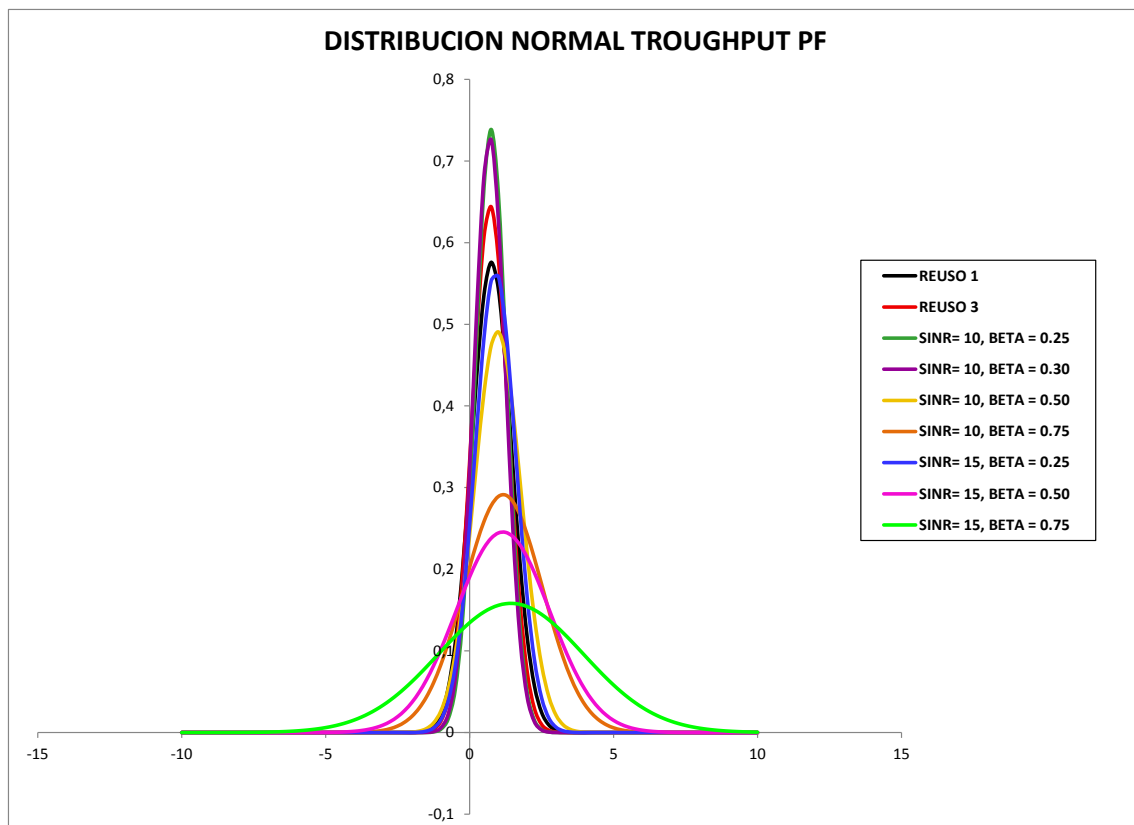


Figura 4.30 Distribución normal del *Throughput* en cada escenario para *Proportional Fair*.



EFICIENCIA ESPECTRAL [bit/c.u]			
ESCENARIO			
REUSO 1			
	PROMEDIO	DESDEV ESTANDAR	
REUSO 1	1,85592079	1,56108764	
REUSO 3	4,20042938	1,422860524	
FFR	SINR= 10, $\beta_{FR}=0.25$	4,09462948	1,452039173
	SINR= 10, $\beta_{FR}=0.30$	3,28252883	1,600719738
	SINR= 10, $\beta_{FR}=0.50$	3,32562983	1,592201218
	SINR= 10, $\beta_{FR}=0.75$	3,24619983	1,691540644
	SINR= 15, $\beta_{FR}=0.25$	3,76015987	1,550259211
	SINR= 15, $\beta_{FR}=0.50$	3,74291787	1,545689539
	SINR= 15, $\beta_{FR}=0.75$	3,87595186	1,837041385

Tabla 4.6 Valores de media y desviación estándar de la eficiencia espectral para cada escenario con *Proportional Fair*.

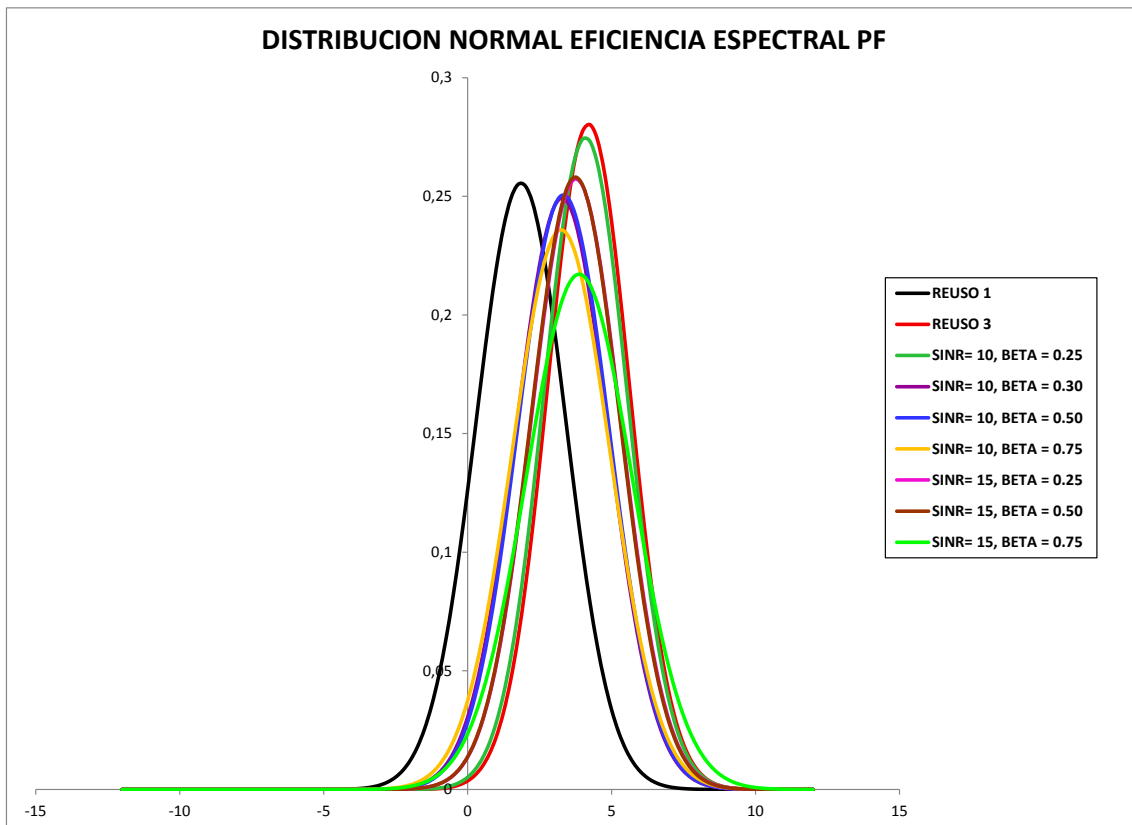


Figura 4.31 Distribución normal de la eficiencia espectral en cada escenario para *Proportional Fair*



- Round Robin

THROUGHPUT [Mb/s]		
ESCENARIO	PROMEDIO	DESV ESTANDAR
REUSO 1	0,76210848	0,692611673
REUSO 3	0,71453243	0,618508876
FFR	SINR= 10, β_{FR} =0.25	0,74302821
	SINR= 10, β_{FR} =0.30	0,70004862
	SINR= 10, β_{FR} =0.50	0,96705923
	SINR= 10, β_{FR} =0.75	1,16965841
	SINR= 15, β_{FR} =0.25	0,89389206
	SINR= 15, β_{FR} =0.50	1,15682594
	SINR= 15, β_{FR} =0.75	1,43558694

Tabla 4.7 Valores de media y desviación estándar del *Throughput* para cada escenario con *Round Robin*

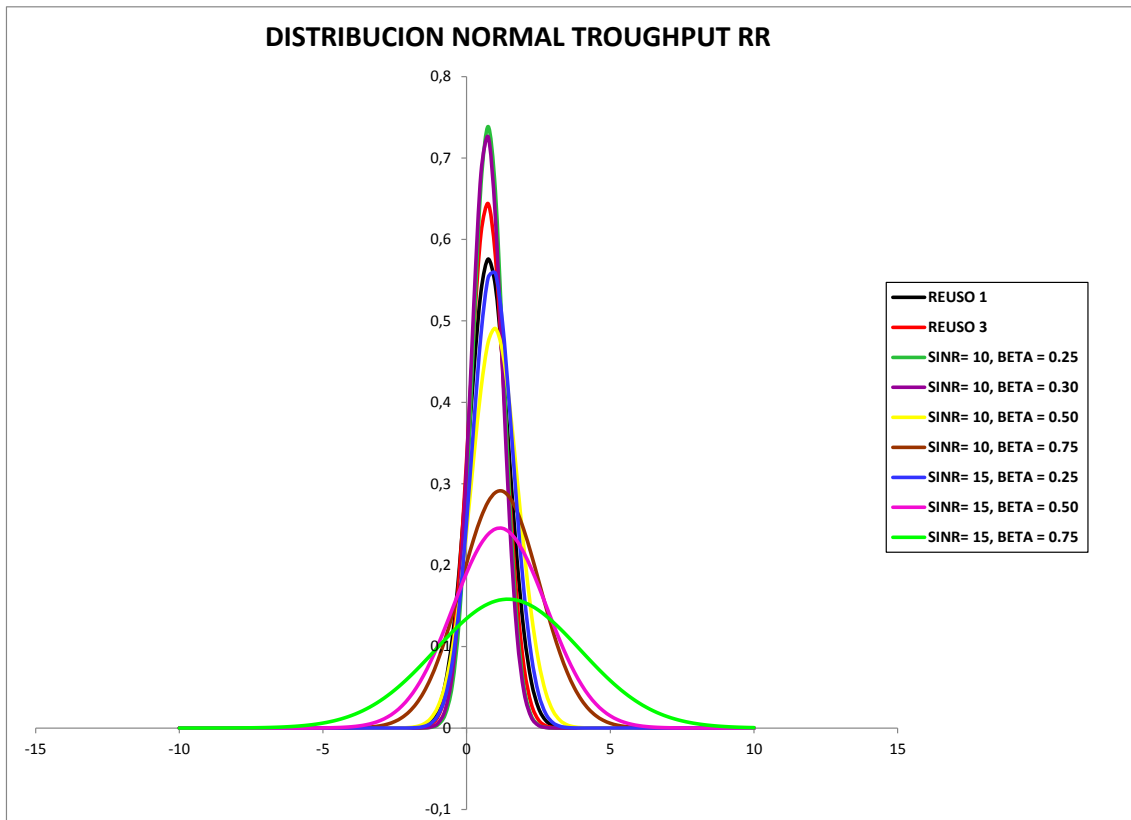


Figura 4.32 Distribución normal del *Throughput* en cada escenario para *Round Robin*.



EFICIENCIA ESPECTRAL [bit/c.u]			
ESCENARIO		PROMEDIO	DESV ESTANDAR
REUSO 1		1,38503331	1,21764354
REUSO 3		3,79439594	1,426763656
FFR	SINR= 10, $\beta_{FR}=0.25$	2,85019578	1,476841792
	SINR= 10, $\beta_{FR}=0.30$	2,82327529	1,458495067
	SINR= 10, $\beta_{FR}=0.50$	2,87025544	1,495180461
	SINR= 10, $\beta_{FR}=0.75$	2,84194851	1,557222078
	SINR= 15, $\beta_{FR}=0.25$	3,33834314	1,504975382
	SINR= 15, $\beta_{FR}=0.50$	3,34506287	1,488687146
	SINR= 15, $\beta_{FR}=0.75$	3,36871005	1,610991636

Tabla 4.8 Valores de media y desviación estándar de la eficiencia espectral para cada escenario con *Round Robin*.

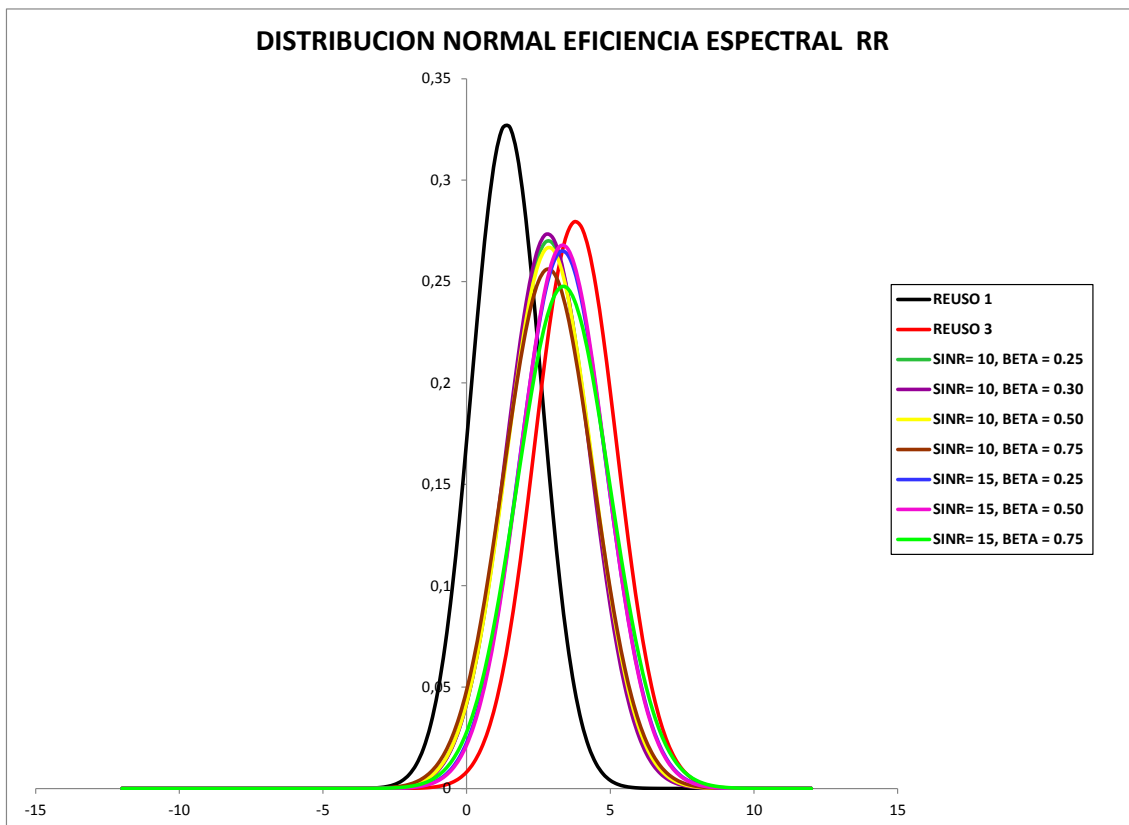


Figura 4.33 Distribución normal de la eficiencia espectral en cada escenario para *Round Robin*.

Las Figuras 4.30, 4.31, 4.32 y 4.33 presentan la distribución normal o campana de gauss [23] obtenidas de las Tablas 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 respectivamente, esta



función permite analizar el comportamiento de las variables aleatorias continuas mediante el modelo definido en la Ecuación 4.2:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.2)$$

Para $X \sim N(\mu, \sigma^2)$,

Donde:

$P(x)$: Función de densidad de probabilidad.

μ : Media.

σ : Desviación estándar.

En las Figuras 4.30, 4.31, 4.32 y 4.33 se observan las funciones de densidad de probabilidad para el *Throughput* y la eficiencia espectral de cada planificador.

El valor de cada curva permite determinar cuál será la probabilidad relativa de que el *Throughput* o la eficiencia espectral tomen un determinado valor cercano a la media calculada para cada escenario.

Analizando las Tablas 4.5 y 4.7 correspondientes al *Throughput* presente en la celda, se observa que para el reuso 1, se obtienen altos valores en la media y la desviación estándar, esto debido a que los usuarios del borde mantienen bajos valores de *Throughput*, mientras los usuarios del centro mantienen altos valores como se observa en la Figura 4.22, llevando a que la media tenga un valor intermedio, pero los datos estén ampliamente dispersos de su valor promedio como se observa en las Figuras 4.30 y 4.32.

De otra forma para el caso del reuso 3, que se observa en la Figura 4.23, los valores de la media y la desviación estándar disminuyen, debido a que el desempeño de los usuarios del borde mejora y el de algunos usuarios del centro se reduce, esto permite que el valor promedio se mantenga y los valores estén menos dispersos de la media en comparación con el reuso 1, incrementándose la probabilidad de ocurrencia como se puede ver en las Figuras 4.30 y 4.32.

Por otra parte para los casos de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) presentes en las Figuras 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 y 4.29 se observan en las Tablas 4.5 y 4.7 en color azul los mejores escenarios donde el valor medio se mantiene y la desviación estándar disminuye en comparación con el reuso 1 y



reuso 3 , lo cual garantiza que tanto usuarios del borde como del centro tengan un desempeño similar, que les permite alcanzar velocidades iguales, adicionalmente en las Figuras 4.30 y 4.32 se observa como la probabilidad de ocurrencia de estos valores tienden a ser considerablemente más alta.

En la Tablas 4.6 y 4.8 se observan los resultados correspondientes a la eficiencia espectral de la celda, donde para el reuso 1 el valor promedio de eficiencia espectral es muy alto a causa de las grandes variaciones de velocidades de los usuarios borde y centro, ya que emplea todo el Ancho de Banda (BW); para el caso del reuso 3 aunque la capacidad disminuye a un 1/3 del ancho de banda en cada celda, la Interferencia Inter-Celda (ICI) se reduce, lo cual garantiza que la velocidad en el borde mejore y por consiguiente la eficiencia promedio disminuya, no obstante, con el Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) aunque disminuye la capacidad en la zona centro a 1/2, y en la zona borde a un 1/6, todos los usuarios mantienen una velocidad promedio que garantiza que la eficiencia espectral sea casi igual a la obtenida con el reuso 3, permitiendo que las bandas en frecuencia transmitan mayor información.

Las mejoras alcanzadas en la eficiencia espectral promedio se pueden ver en las Figuras 4.31 y 4.33 con el desplazamiento de las curvas hacia la derecha, y el incremento de la probabilidad de ocurrencia para los mejores escenarios del Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR).

Siendo así, se observa que los cuadros subrayados en color amarillo de las Tablas 4.6 y 4.8 correspondientes a los mejores escenarios de *Throughput* de color azul en las Tablas 4.5 y 4.7, son aquellos que garantizan mayor rendimiento o uso de los recursos, tanto para usuarios con SINR baja como alta.

De esta forma, se puede decir que el alto valor de *Throughput* y eficiencia espectral en la celda, se debe a la disminución de la Interferencia Inter-Celda (ICI) que permite que los usuarios borde y centro puedan mantener la calidad del servicio.

Finalmente al comparar el desempeño de los planificadores se observa que el mejor es *Proportional Fair*, al permitir valores más altos de *Throughput* y eficiencia espectral, debido, a que no solo emplea la técnica de Coordinación de Interferencia Inter-Celda (ICIC), Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR), sino que tiene en cuenta las condiciones de los usuarios en la repartición de recursos, lo cual garantiza mayores velocidad en transmisión a cada usuario, especialmente a los situados en el borde de la celda.



5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos en el trabajo de grado Análisis de Interferencia en LTE con Reuso de Frecuencia de Frecuencia Fraccional (FFR) y trabajos futuros.

5.1 CONCLUSIONES

- La técnica de coordinación de interferencia Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) mejora la calidad del servicio en redes LTE, al mitigar la interferencia causada por las señales de celdas adyacentes.
- La evaluación de capacidad de los escenarios según el esquema de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) y la variación de los parámetros β_{FR} y Γ_{thr} , determinó que *Proportional Fair* con $\Gamma_{thr}=10$ y $\beta_{FR}= 0.25$, presenta los mejores resultados para mitigar la Interferencia Inter-Celda (ICI) en un sistema LTE. al presentar un *Throughput* medio igual a 1.6 Mbps y una eficiencia espectral media igual a 5 bit/cu logrando que los Equipos de Usuarios (UE) tengan un comportamiento equitativo entre la zona centro y límite con velocidades de transmisión de datos mayores a 1 Mbps.
- La evaluación del Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) para las diferentes combinaciones de β_{FR} y Γ_{thr} en un sistema SISO LTE, muestra que *Proportional Fair* con $\beta_{FR}= 0.30$ y $\Gamma_{thr}= 10$ dB mejora el desempeño en la celda, al obtener ganancias en el *Throughput* medio, pico y borde iguales a 5% (equivalente a 1.3 Mbps), 70% (4 Mbps) y 45% (0.7 Mbps), respectivamente.
- El Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) en LTE al mitigar la Interferencia Inter- Celda (ICI), permite que un mayor número de usuarios experimenten velocidades de transmisión más altas, independiente de su ubicación dentro de la celda.
- *Proportional Fair* es el planificador más adecuado a implementar en un sistema LTE con Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR), dado que en el mejor escenario ($\Gamma_{thr}= 10$ con $\beta_{FR}= 0.25$), la probabilidad de alcanzar



una eficiencia espectral superior a 3 bit/cu y un *Throughput* mayor a 1 Mbps es del 57% y 78 % respectivamente, mientras que en *Round Robin* es del 30 y 60%.

- El simulador LTE de Viena a nivel de sistema, es una herramienta útil en el estudio y diseño de redes LTE, ya que logra incorporar gran variedad de características propias del estándar, que facilitan el análisis de nuevas técnicas de control y coordinación de recursos radio en los sistemas de telecomunicaciones.
- El Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) es una técnica que permite modelar las dimensiones de las zonas límite y centro, el ancho de banda (BW), el factor de reuso e incorporar diferentes planificadores y técnicas de control según los requerimientos de cada sistema.
- La evaluación probabilística mostró que los escenarios del Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) delimitados en la zona centro entre 10 dB y 15 dB, con una asignación del ancho de banda del 25% al 30 % ($\beta_{FR}=0.25$ y $\beta_{FR}=0.30$), presentan mejor desempeño, dado que la media muestral alcanza valores de 0,81 con una varianza de 0,25 y una probabilidad de ocurrencia del 20 % mayor que los escenarios con reuso 1 y reuso 3.
- La variación de los parámetros Γ_{thr} en el rango de -2 a 22.5 dB y del β_{FR} entre 1 y 0.01, genera que solo una de las zonas de la celda mejore o mantenga su desempeño en valores cercanos a 1 Mbps, para un número determinado de usuarios. Por lo que es importante encontrar un punto de equilibrio que conserve el *Throughput* medio en toda la celda.



5.2 TRABAJOS FUTUROS

- Analizar la técnica Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) junto con otros mecanismos de coordinación de interferencia como control ideal de potencia, *beamforming*, entre otros.
- Desarrollar un análisis de la técnica Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) con el planificador *Round Robin* en zona centro y *Proportional Fair* en la zona borde y viceversa.
- Realizar análisis de la técnica Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) con planificadores como *Best CQI*, *Resource Fair*.
- Implementar un sistema con las técnicas Reuso de Frecuencia Fraccional suave (*Soft FFR*) y Reuso de Frecuencia Fraccional sectorizado (*Sectorized FFR*), en un sistema LTE SISO.
- Analizar la interferencia en redes heterogéneas en LTE, haciendo uso de la técnica de coordinación Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR).
- Desarrollar una técnica de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) adaptativa al tráfico en la zona borde y centro.



REFERENCIAS

- [1] H. Holma, A. Toskala, LTE for UMTS- OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access, 1st Ed., John Wiley and Sons, 2009.
- [2] P. Lee, T. Lee, “Interference Management in LTE Femtocell Systems Using Fractional Frequency Reuse”, School of Information and Communication Engineering, Feb. 2010.
- [3] G. Rizwan, K. Raymond, “Fractional Frequency Reuse and Interference Suppression for OFDMA Networks”, Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt), 2010.
- [4] B. Tiwari, “Enabling reuse 1 in 4G Networks”, beyond4g.org, Jul. 2010.
- [5] D. Biliou, C. Bouras, “Optimization of Fractional Frequency Reuse in Long Term Evolution Networks”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference: Mobile and Wireless Networks, 2012.
- [6] N. Saquib, et. al, “Fractional Frequency Reuse for Interference Management in LTE-Advanced HetNets”, IEEE Wireless Communications, Jun. 2012.
- [7] R. Chang, Z. Tao, “A Graph Approach to Dynamic Fractional Frequency Reuse (FFR) in Multi-Cell OFDMA Networks”, Mitsubishi Electric Research Laboratories, Jul. 2009.
- [8] E. J. Lopez, “Análisis de las Estrategias de Gestión del Espectro Radioeléctrico en un Sistema LTE con la herramienta Atoll”, Tesis de Grado, Universidad Politécnica de Catalunya, 2012.
- [9] F. Khan, LTE for 4G Mobile Broadband, 1st Ed, Cambridge University Press, 2009, ch 16.
- [10] R. Agustí, et. al (Coord. R. Agustí), LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles, Fundación Vodafone España, 2010.
- [11] E. Dahlman, et. al, “4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband”, Ed. Academic Press is an imprint of Elsevier, 2011, Ch. 8.
- [12] S. Sesia, et. al, “LTE The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice”, Ed. John Wiley and Sons, 2009, Ch. 1



- [13] E. Astaiza, et. al, “Simulación de Sistemas de Telecomunicaciones”, 2007.
- [14] “Recommendation ITU-R M.1225: Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000”, Tech. Rep., 1997.
- [15] T. B. Sorensen, et. al, “Extension of the itu channel models for wideband (ofdm) systems”, in Proc. 2005 IEEE 62nd Vehicular Technology Conference, 2005.
- [16] L. Hentila, et. al, “MATLAB implementation of the WINNER Phase II Channel Model ver1.1”, December 2007. [Online]. Available: [https://www.ist-winner.org/phase 2 model.html](https://www.ist-winner.org/phase%20model.html)
- [17] J. Ikuno, et. al, “System level simulation of LTE networks”, 2010 IEE 71st Vehicular Technology Conference, May. 2010.
- [18] J. C. Ikuno, et. al, “A fairness-based performance evaluation of fractional frequency reuse in LTE”, in 17th International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA2013), Stuttgart, Germany, Mar. 2013.
- [19] B. Krasniqi, et. al, “Network-load dependent partial frequency reuse for lte”, in 9th International Symposium on Communications and Information Technology (ISCIT2009), Incheon, Korea, Sept. 2009.
- [20] T. Novlan, et. al, “Comparison of fractional frequency Reuse approaches in the OFDMA cellular downlink”, in Proceedings of the 2010 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM2010), Baltimore, Maryland, Dec. 2010.
- [21] L. Chen, D. Yuan, “Generalized frequency reuse schemes for OFDMA networks: Optimization and comparison”, in IEEE 71st Vehicular Technology Conference (VTC2010-Spring), Taipei, Taiwan, May 2010.
- [22] J. Santos del Cerro y M. Garcia, Historia de la probabilidad y de la estadística (III), Madrid: Delta, 2006.
- [23] G. Canavos, Estadística, mexico: Mc Graw Hill, 1988.
- [24] C. Mehlführer, et. al, “The Vienna LTE simulators – Enabling reproducibility in wireless communications research”, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2011.



ANEXO A

A.1 ESTRUCTURA DEL SIMULADOR LTE DE VIENA

La estructura del simulador LTE de Viena a nivel consta de 2 partes [24]:

- **Modelo de Medición del Enlace.**
- **Modelo de Desempeño del Enlace.**

El Modelo de Medición del Enlace es el encargado de realizar la adaptación del enlace y la asignación de recursos en el sistema, de esta forma se muestra cual es la calidad del enlace [24].

La medida de la calidad del enlace se evalúa por subportadoras, a través de las mediciones proporcionadas por los Equipos de Usuarios (UE), principalmente se basa en la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR), y los *feedback* (como son el Indicador de Matriz de Precodificación (PMI, *Precoding Matrix Indicator*), la Indicación de Rango (RI, *Rank Indication*), y el Indicador de la Calidad del Canal (CQI) calculados por cada Equipo de Usuario (UE), los cuales son empleados para adaptar el enlace en el Nodo B Evolucionado (eNB), donde el algoritmo de planificación asigna recursos a los usuarios para optimizar el desempeño del sistema (por ejemplo, en términos de *Throughput*). De acuerdo al Modelo de Medición del Enlace, el Modelo de Desempeño del Enlace calcula la Tasa de Error de Bloque (BLER, *Block Error Rate*) del enlace, basado en la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) recibida y los parámetros de transmisión (por ejemplo, modulación y codificación) [24].

La Figura A.1 ilustra la interacción entre los dos modelos y varios parámetros de la capa física [24].

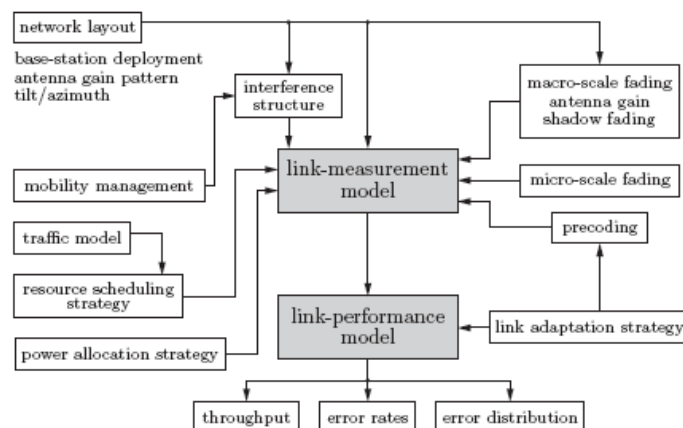


Figura A.1 Diagrama Esquemático de Bloques del Simulador LTE a Nivel de Sistema.

La ejecución del simulador sigue la estructura que se muestra en la Figura A.2, donde cada elemento de la red es representado por un objeto de clases y el modelo de tráfico asume un *buffer* lleno para el Enlace de Bajada (DL) [24].

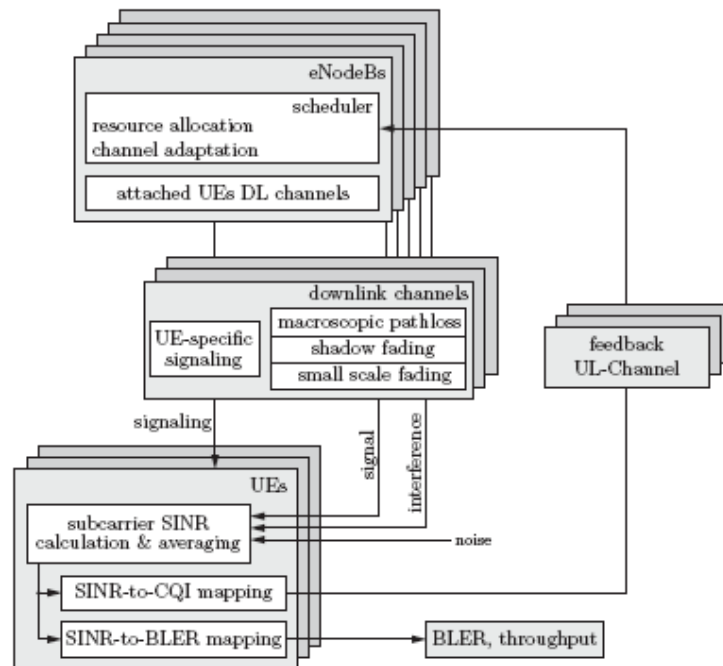


Figura A.2 Diagrama Esquemático de Clases que Muestra la Implementación del Simulador LTE a Nivel de Sistema.

Las clases del simulador presentes en el sistema permiten observar como el planificador asigna los recursos físicos, matrices de precodificación y un Esquema de Modulación y Codificación (MCS, *Modulation and Coding Scheme*) adecuado para cada Equipo de Usuario (UE) conectado a un Nodo B Evolucionado (eNB), donde dicha asignación real depende del algoritmo de planificación y el *feedback* recibido del UE [24].

En el lado del Equipo de Usuario (UE), la subportadora recibida post-equalizada permite calcular la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) en el Modelo de Medición del Enlace. La Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) es determinada por la señal, la interferencia y los niveles de potencia de ruido, que principalmente depende de la distribución de las celdas (la cual está definida por las posiciones de los Nodo B Evolucionado (eNB), las pérdidas de propagación a gran escala, el desvanecimiento por sombra), y el desvanecimiento a pequeña escala variante en el tiempo [24].

Por otra parte, los Indicadores de la Calidad del Canal (CQI) *feedback* se calculan en base a la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) de las



subportadoras y la Tasa de Error de Bloque (BLER) objetivo. Estos son generados a través de un mapeo de Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) a Indicador de la Calidad del Canal (CQI) y son implementados por el Nodo B Evolucionado (eNB) a través de un canal *feedback* con retardo ajustable en el Enlace de Subida (UL) [24].

En el transmisor, un Esquema de Modulación y Codificación (MCS) adecuado es seleccionado por el CQI para lograr la Tasa de Error de Bloque (BLER) objetivo durante la transmisión, es clave resaltar que para el caso de escenarios con alta movilidad, existe un retardo en el *feedback* que es causado por los altos tiempos de computación y de señalización que puede conducir a una degradación del desempeño, si los cambios significativos del estado del canal duran el retardo. En el Modelo de Desempeño del Enlace, un modelo de canal con Ruido Blanco Auditivo Gaussiano (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*) equivalente a la Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR) es obtenido a través de la Métrica de Información Mutua de la Relación Señal a Ruido más Interferencia Efectiva (MIESM, *Mutual Information Effective SINR Metric*) [24].

En un segundo paso, a la SINR se asigna una Tasa de Error de Bloque (BLER) través de las curvas de desempeño del enlace AWGN. El valor de Tasa de Error de Bloque (BLER) actúa como una probabilidad para el cálculo del Acuse de Recibo (ACK, *Acknowledgement*) o del Acuse de Recibo Negativo (NACK, *Negative Acknowledgement*), que junto con el tamaño del Bloque de Transporte (TB, *Transport Block*) permiten calcular el *Throughput* del enlace. La salida de la simulación consiste en curvas, que contienen el *Throughput* del enlace, las tasas de error para cada usuario, así como estadísticas de *Throughput* y tasas de error de cada una de las celdas empleadas [24].

ANEXO B

ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

B.1 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA SINR -2 dB

En las Figura B.1, Figura B.2, Figura B.3 y Figura B.4 se muestra claramente como para el umbral de SINR -2 dB se varía el Ancho de Banda (BW) en las zonas de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR) desde un β_{FR} de 1 hasta 0.01, empleando toda la banda de frecuencia en cada una de las zonas.

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = -2$ dB y $\beta_{FR} = 0.75$

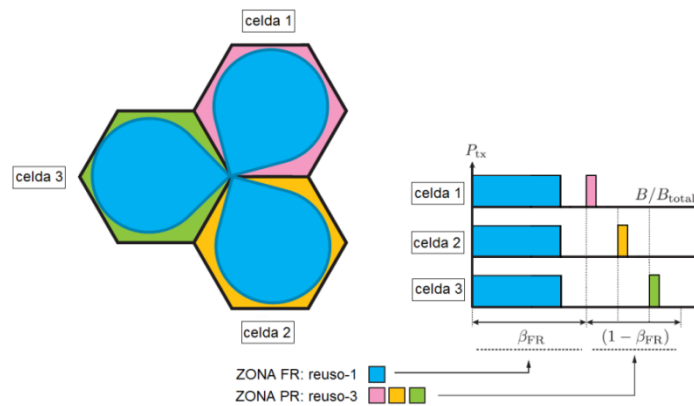


Figura B.1 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = -2$ dB y $\beta_{FR} = 0.75$.

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = -2$ dB y $\beta_{FR} = 0.5$

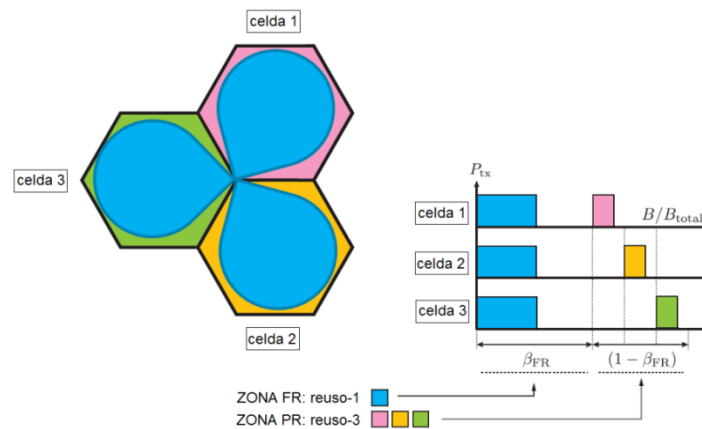


Figura B.2 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = -2$ dB y $\beta_{FR} = 0.5$.

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = -2$ dB y $\beta_{FR} = 0.25$

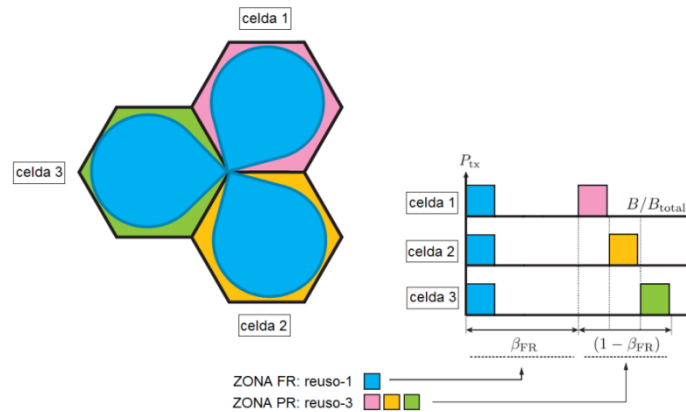


Figura B.3 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = -2$ dB y $\beta_{FR} = 0.25$.

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = -2$ dB y $\beta_{FR} = 0.01$

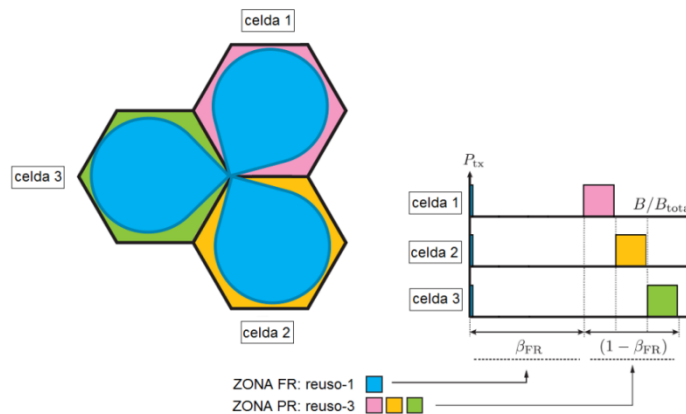


Figura B.4 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = -2$ dB y $\beta_{FR} = 0.01$.

B.2 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA SINR 5 dB

En las Figura B.5, Figura B.6, Figura B.7, Figura B.8 y Figura B.9 se muestra en detalle los esquemas de Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) para el umbral de SINR 5 dB, con los diferentes valores de Ancho de Banda (BW) empleados en las zonas de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR).



- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 5$ dB y $\beta_{FR} = 1$

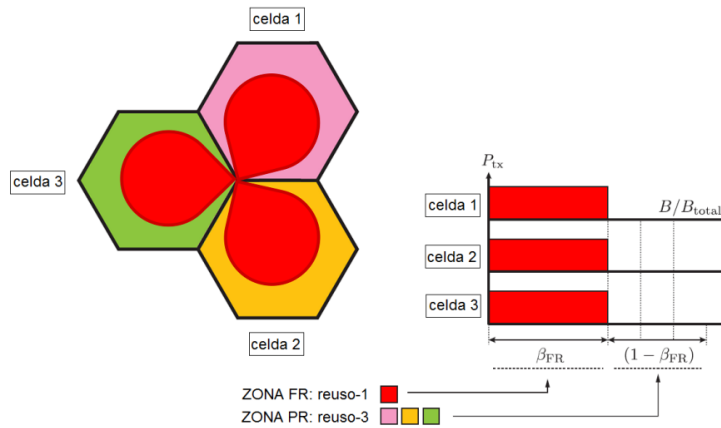


Figura B.5 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 5$ dB y $\beta_{FR} = 1$.

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 5$ dB y $\beta_{FR} = 0.75$

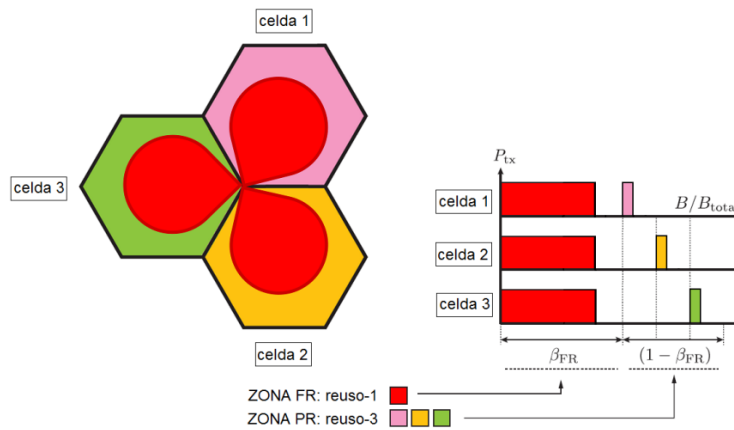


Figura B.6 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 5$ dB y $\beta_{FR} = 0.75$.

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 5$ dB y $\beta_{FR} = 0.5$

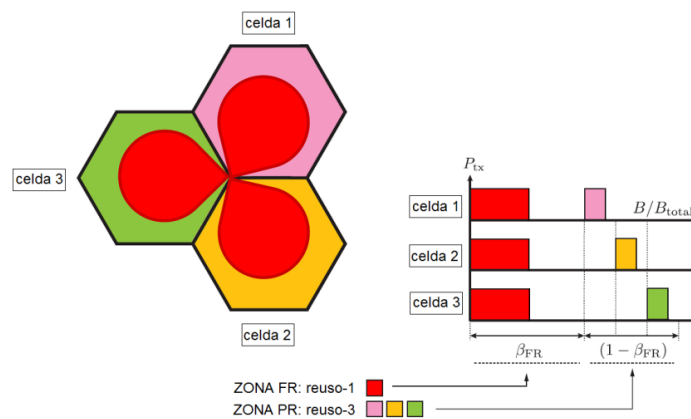


Figura B.7 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 5$ dB y $\beta_{FR} = 0.5$.

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 5$ dB y $\beta_{FR} = 0.25$

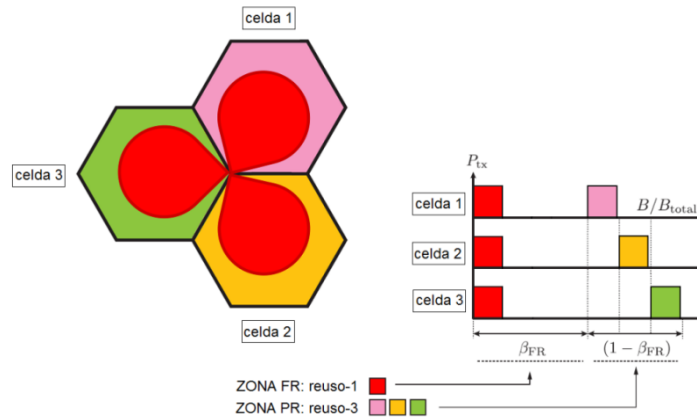


Figura B.8 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 5$ dB y $\beta_{FR} = 0.25$.

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 5$ dB y $\beta_{FR} = 0.01$

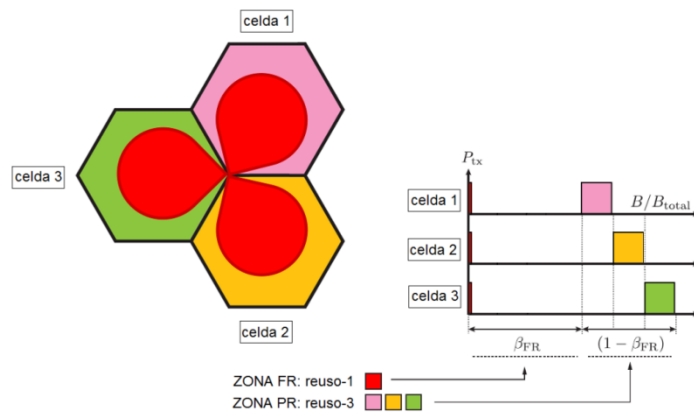


Figura B.9 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 5$ dB y $\beta_{FR} = 0.01$.

B.3 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA SINR 10 dB

En las Figura B.10, Figura B.11, Figura B.12, Figura B.13 y Figura B.14 se muestra como se emplea el Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) para el umbral de SINR 10 dB, con diferentes Anchos de Banda (BW) en las zonas de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR).

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 10$ dB y $\beta_{FR} = 1$

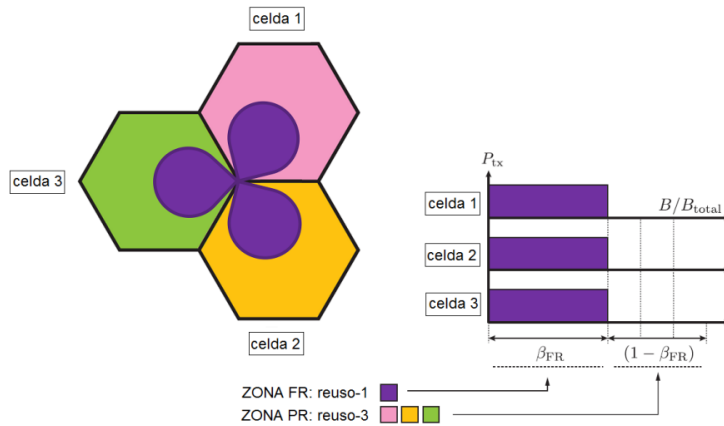


Figura B.10 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 10$ dB y $\beta_{FR} = 1$.

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 10$ dB y $\beta_{FR} = 0.75$

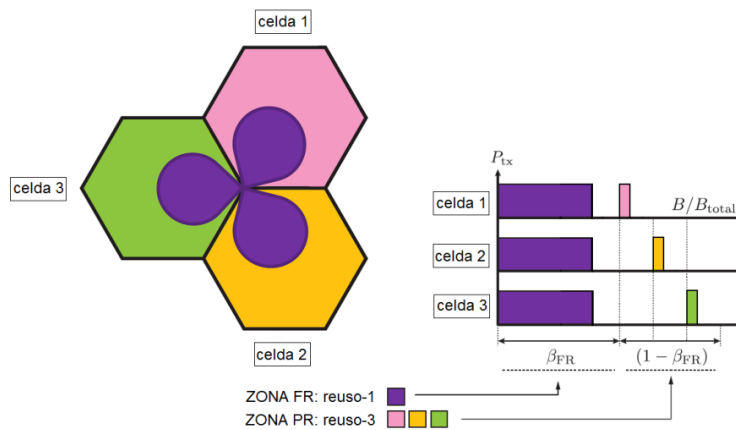


Figura B.11 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 10$ dB y $\beta_{FR} = 0.75$.

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 10$ dB y $\beta_{FR} = 0.5$

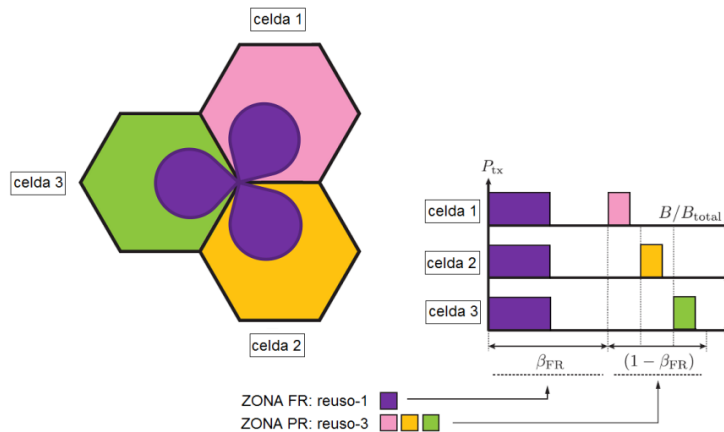


Figura B.12 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 10$ dB y $\beta_{FR} = 0.5$.

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 10$ dB y $\beta_{FR} = 0.25$

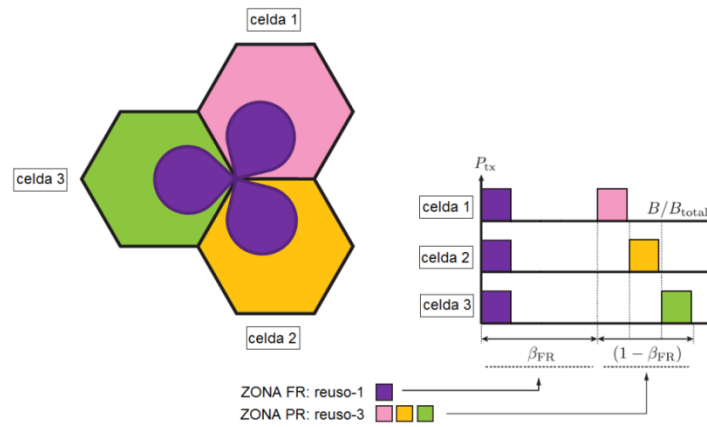


Figura B.13 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 10$ dB y $\beta_{FR} = 0.25$.

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 10$ dB y $\beta_{FR} = 0.01$

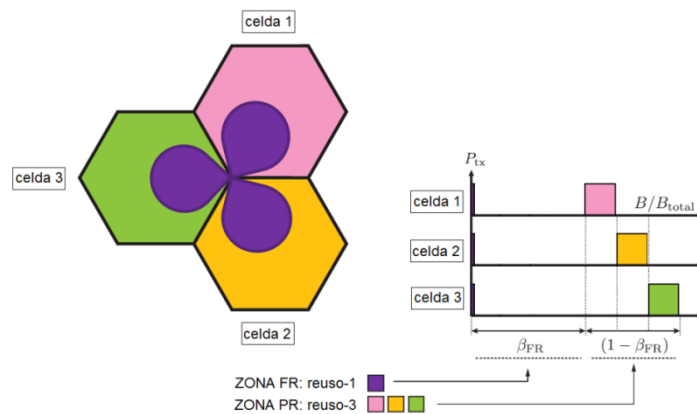


Figura B.14 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 10$ dB y $\beta_{FR} = 0.01$.

B.4 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA SINR 22.5 dB

En las Figura B.15, Figura B.16, Figura B.17 y Figura B.18 se muestra como se emplea el Reuso de Frecuencia Fraccional (FFR) para el umbral de SINR 10dB, con diferentes Anchos de Banda (BW) en las zonas de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR).

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 22.5$ dB y $\beta_{FR} = 1$

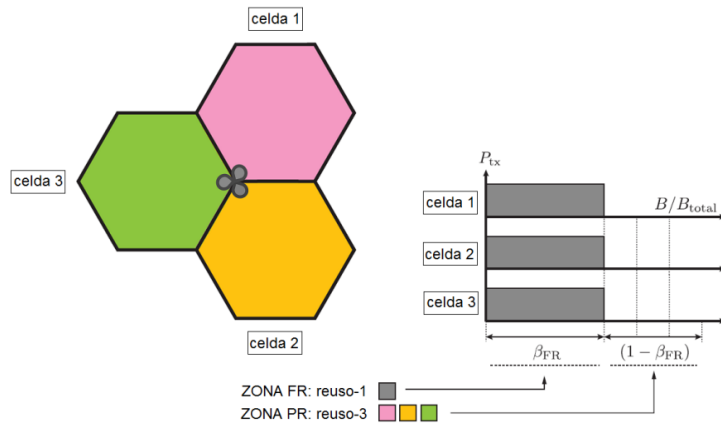


Figura B.15 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 22.5$ dB y $\beta_{FR} = 1$.

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 22.5$ dB y $\beta_{FR} = 0.75$

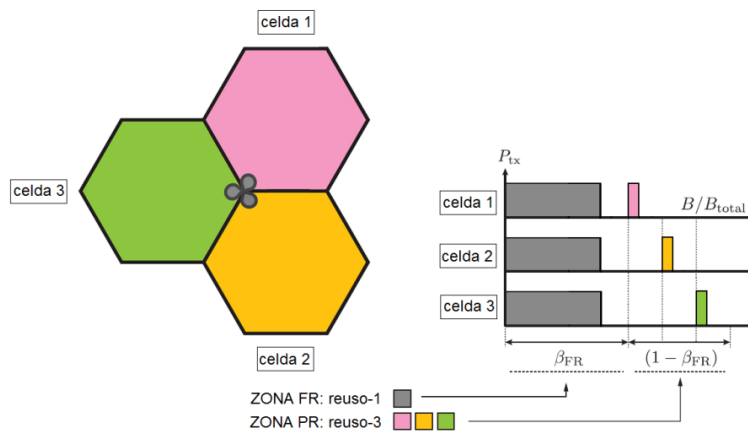


Figura B.16 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 22.5$ dB y $\beta_{FR} = 0.75$.

- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 22.5$ dB y $\beta_{FR} = 0.5$

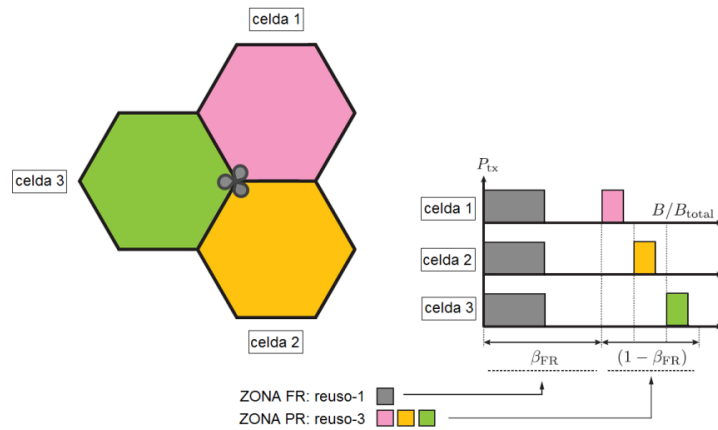


Figura B.17 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 22.5$ dB y $\beta_{FR} = 0.5$.



- SINR Umbral $\Gamma_{thr} = 22.5$ dB y $\beta_{FR} = 0.25$

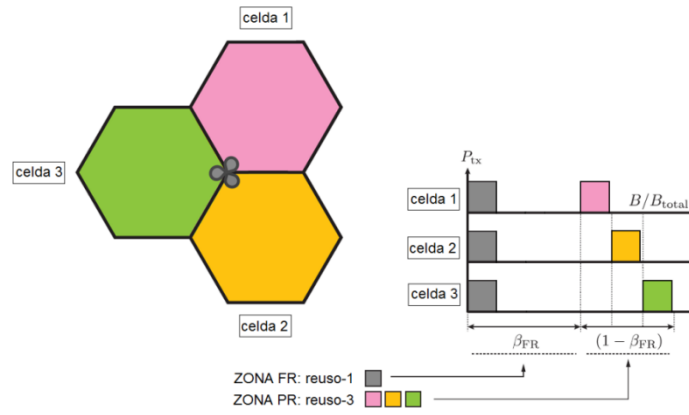


Figura B.18 Escenario FFR con $\Gamma_{thr} = 22.5$ dB y $\beta_{FR} = 0.25$.



ANEXO C

DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN Y CURVAS DE FUNCIÓN DE PROBABILIDAD EMPÍRICA

C.1 DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN Y CURVAS DE FUNCIÓN DE PROBABILIDAD EMPÍRICA (ECDF) PARA PROPORTIONAL FAIR

C.1.1 Resultados para SINR -2 dB

Las Figura C.1, Figura C.2, Figura C.3 y Figura C. 4 muestran los diagramas de dispersión y las curvas de Función de Probabilidad Empírica (ECDF) del *Throughput* y la eficiencia espectral para un SINR umbral igual a -2 dB, con diferentes variaciones del Ancho de Banda (BW) que se emplean en las zonas de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR).

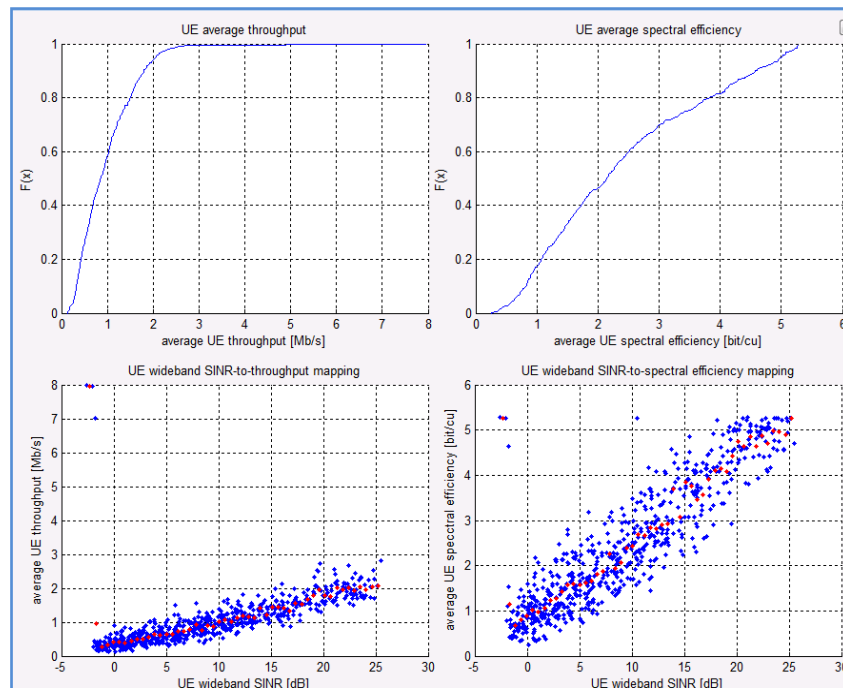


Figura C.1 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = -2$ dB con $\beta_{FR} = 0.75$.

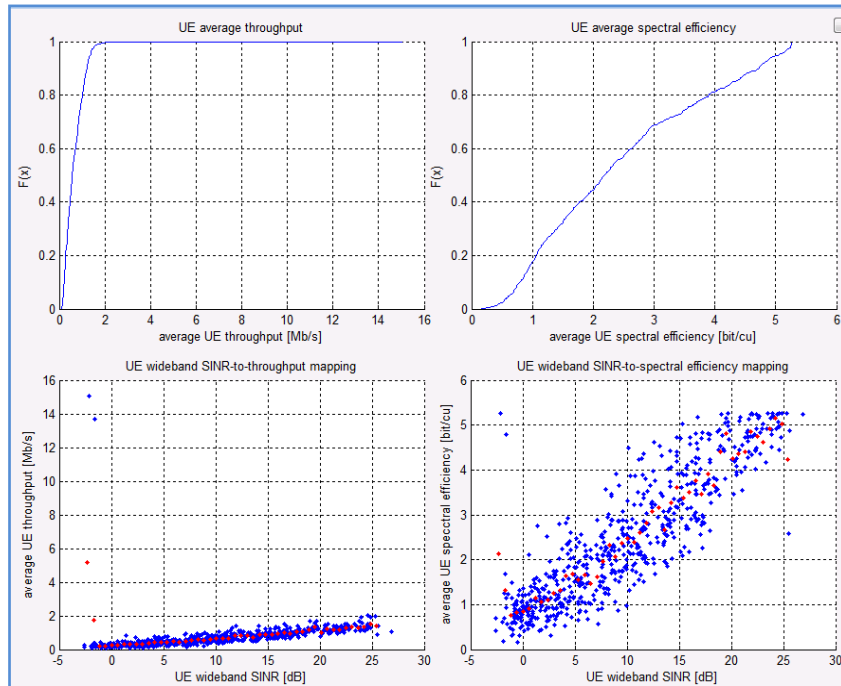


Figura C.2 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = -2$ dB con $\beta_{FR} = 0.5$.

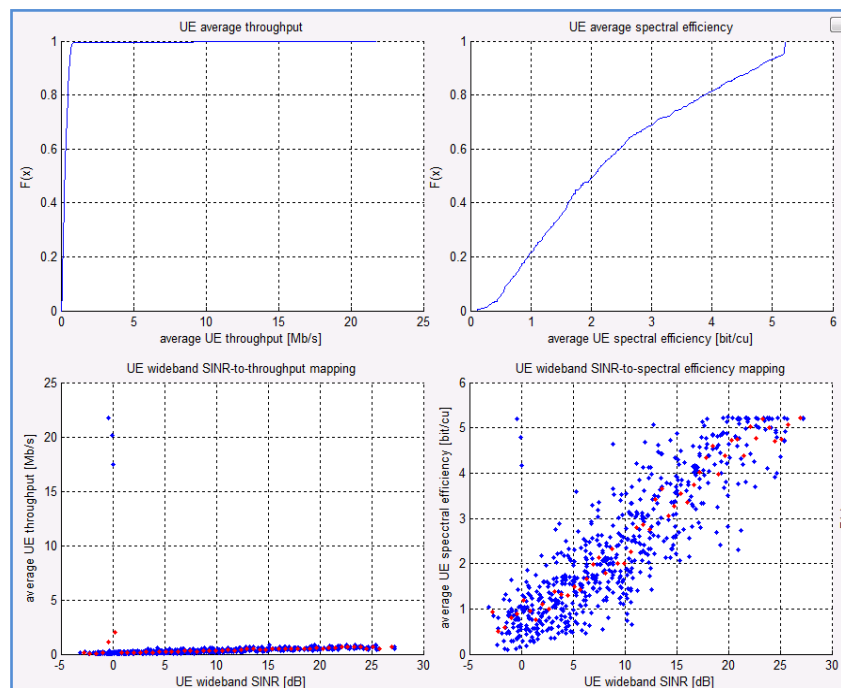


Figura C.3 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = -2$ dB con $\beta_{FR} = 0.25$.

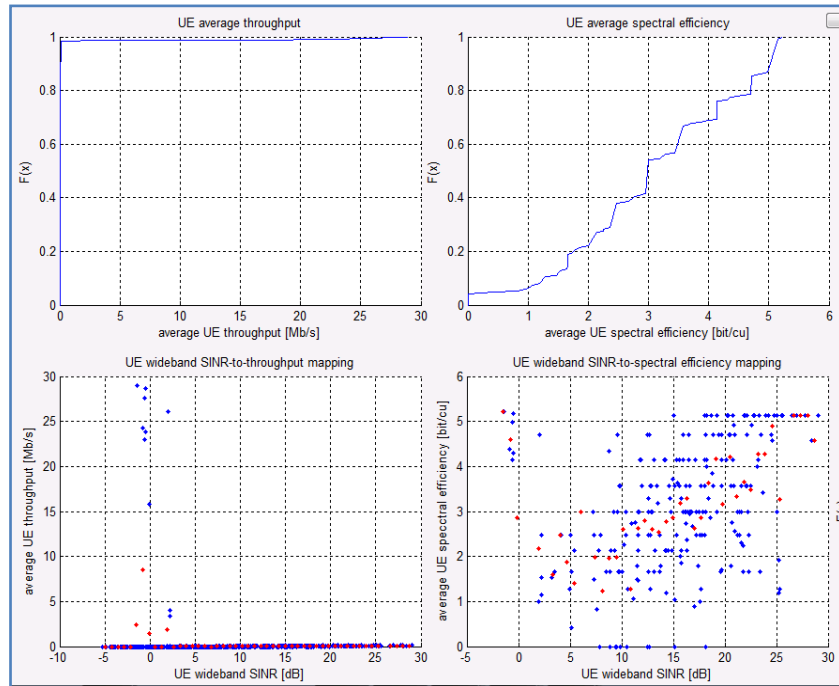


Figura C. 4 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = -2$ dB con $\beta_{FR} = 0.01$.

C.1.2 Resultados para SINR 5 dB

Las Figura C.5, Figura C.6, Figura C.7, Figura C.8, Figura C.9 muestran los Diagramas de dispersión y las curvas de Función de Probabilidad Empírica (ECDF) del *Throughput* y la eficiencia espectral para un SINR umbral igual a 5 dB, con diferentes variaciones del Ancho de Banda (BW) que se emplean en las zonas de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR).

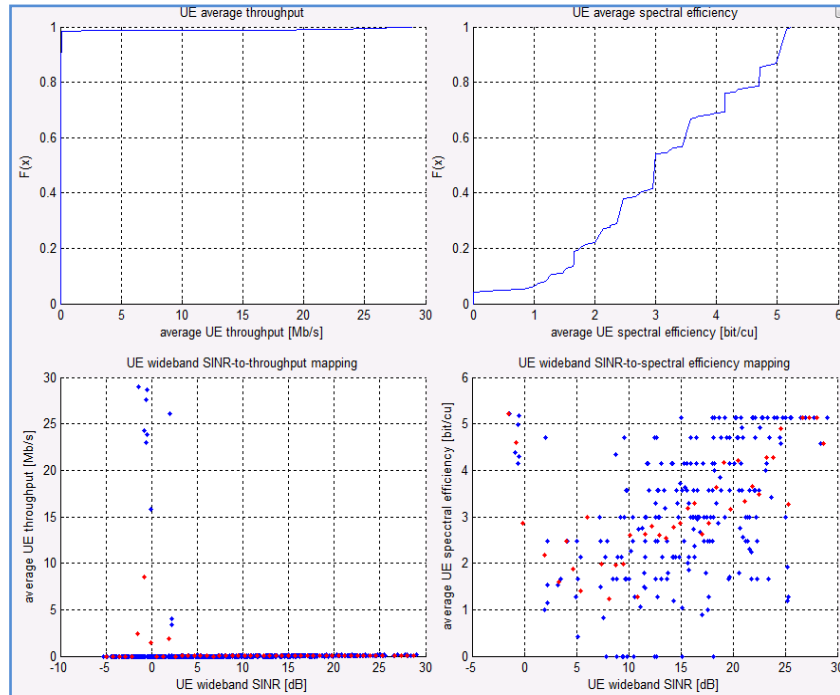


Figura C.5 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=5$ dB con $\beta_{FR}=1$.

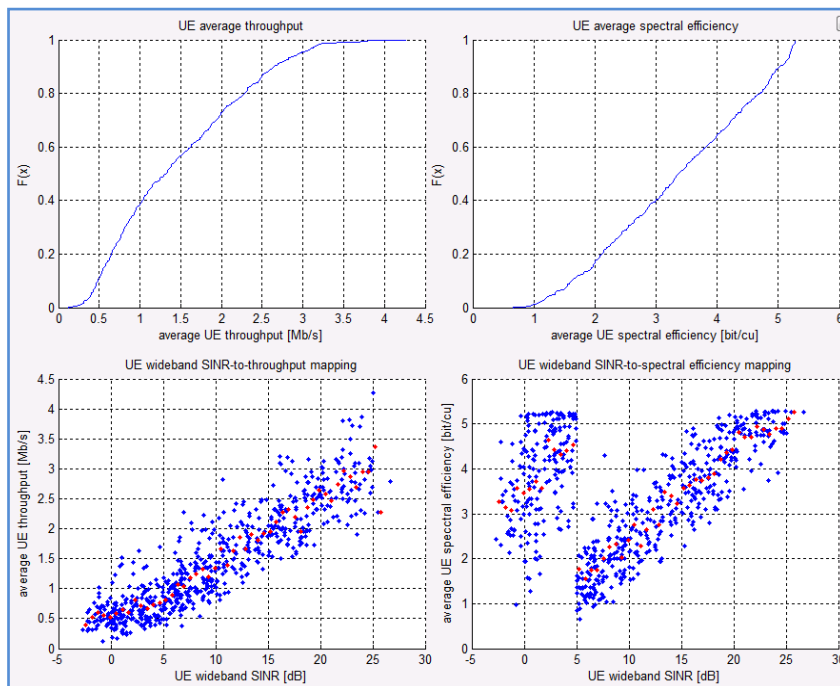


Figura C.6 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=5$ dB con $\beta_{FR}=0.75$.

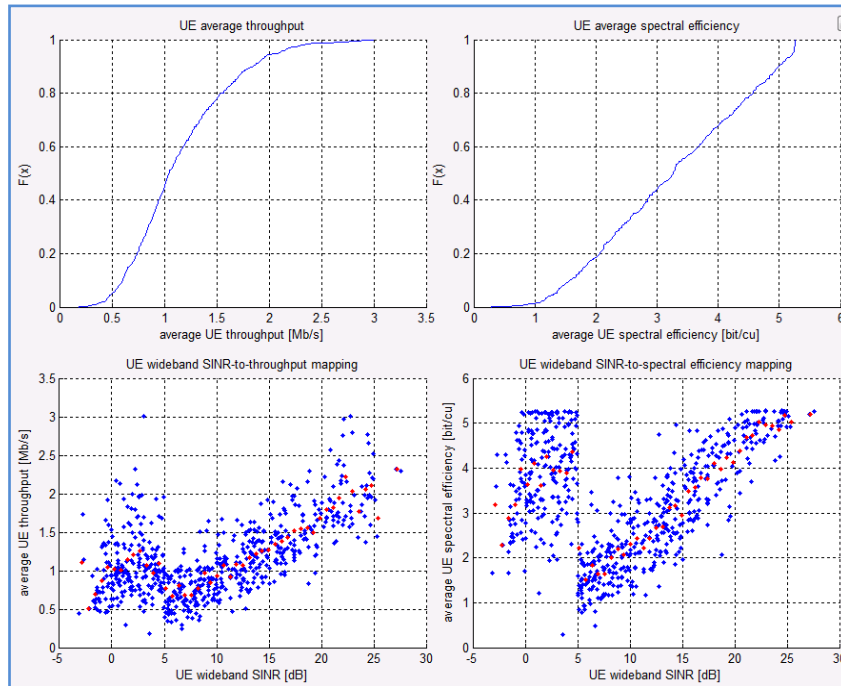


Figura C.7 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 5$ dB con $\beta_{FR}=0.5$.

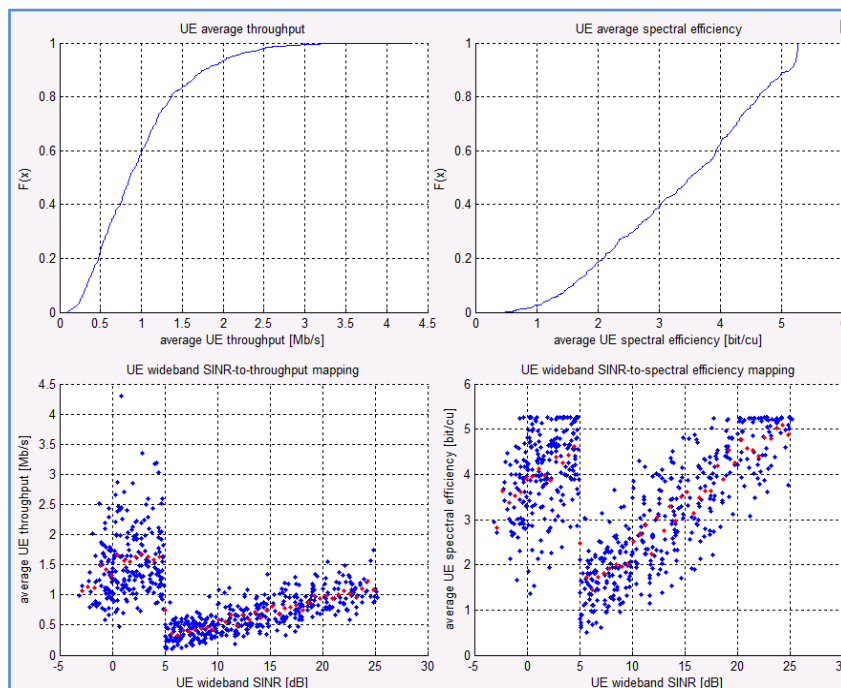


Figura C.8 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 5$ dB con $\beta_{FR}=0.25$.

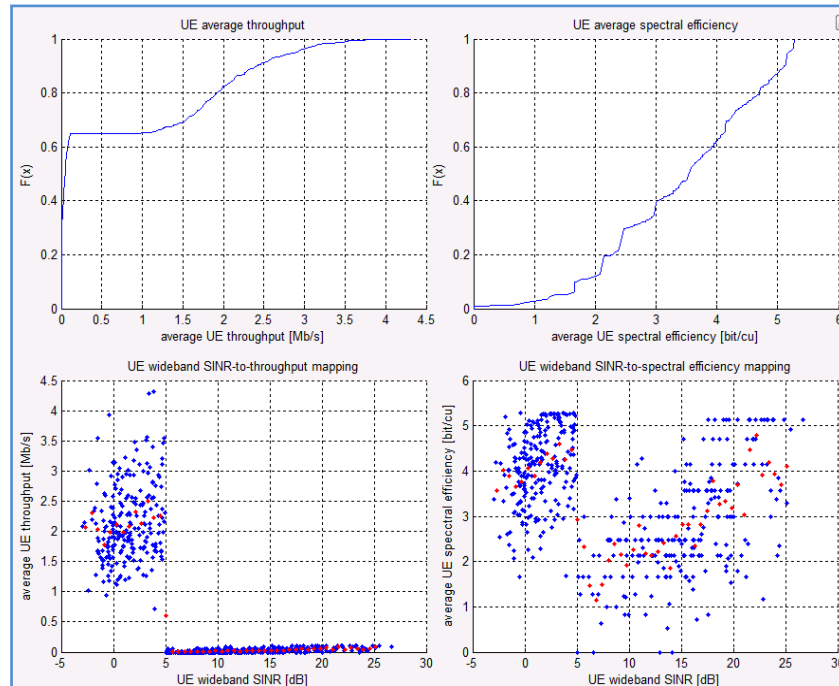


Figura C.9 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 5$ dB con $\beta_{FR}=0.01$.

C.1.3 Resultados para SINR 10 dB

Las Figura C.10, Figura C.11, Figura C.12 y Figura C.13 muestran los diagramas de dispersión y las curvas de Función de Probabilidad Empírica (ECDF) del *Throughput* y la eficiencia espectral para un SINR umbral igual a 10 dB, con diferentes variaciones del Ancho de Banda (BW) que se emplean en las zonas de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR).

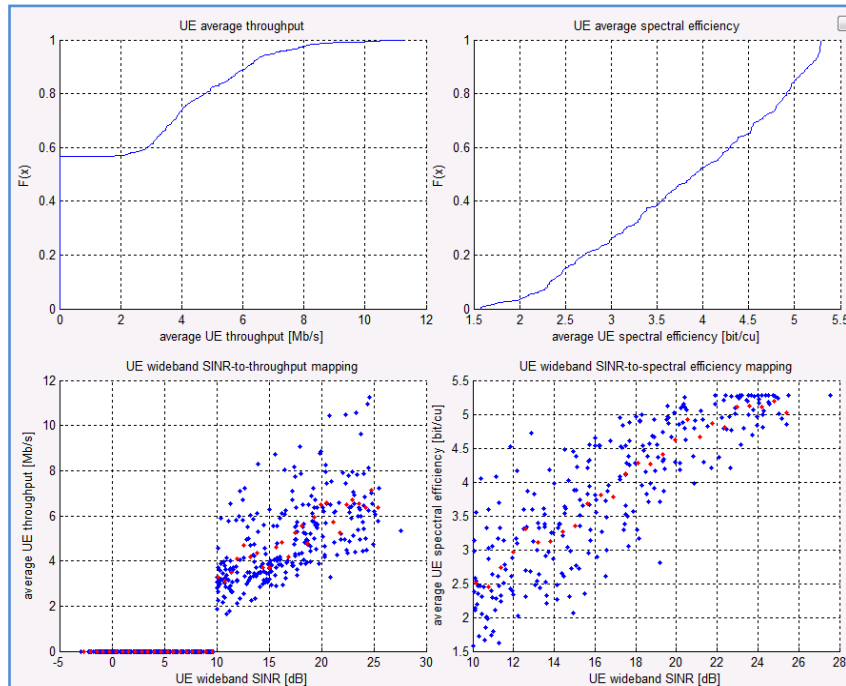


Figura C.10 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 10$ dB con $\beta_{FR}=1$.

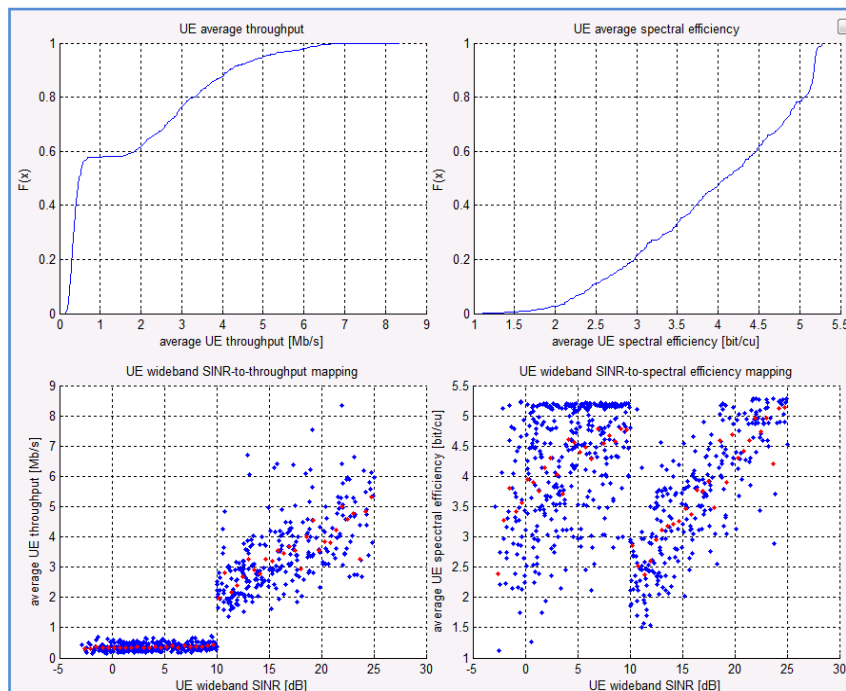


Figura C.11 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 10$ dB con $\beta_{FR}= 0.75$.

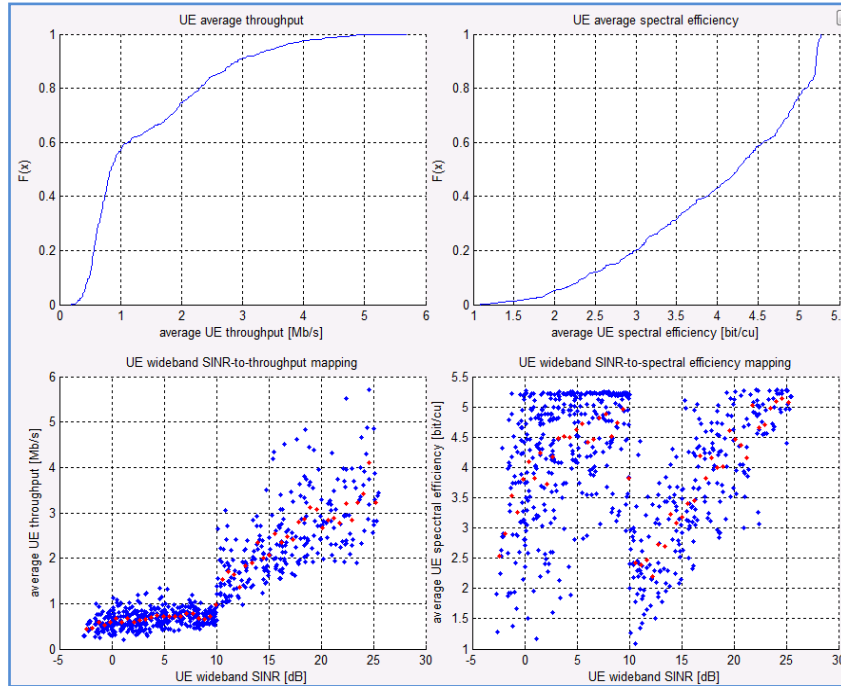


Figura C.12 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 10$ dB con $\beta_{FR}= 0.5$.

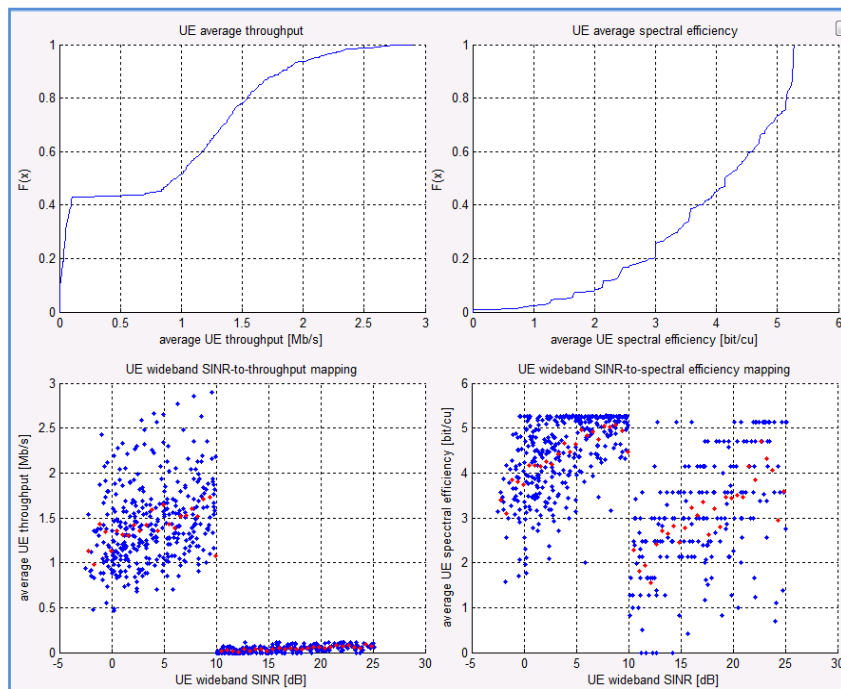


Figura C.13 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 10$ dB con $\beta_{FR}= 0.01$.



C.1.4 Resultados para SINR 15 dB

Las Figura C.14Figura C.15Figura C.16Figura C.17 muestran los diagramas de dispersión y las curvas de Función de Probabilidad Empírica (ECDF) del *Throughput* y la eficiencia espectral para un SINR umbral igual a 15 dB, con diferentes variaciones del Ancho de Banda (BW) que se emplean en las zonas de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR).

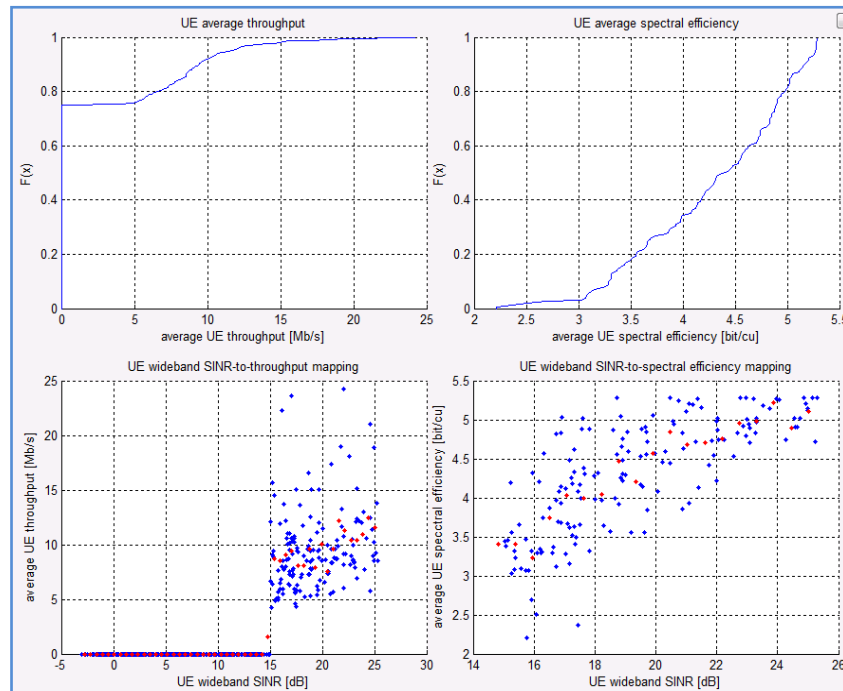


Figura C.14 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 15$ dB con $\beta_{FR}=1$.

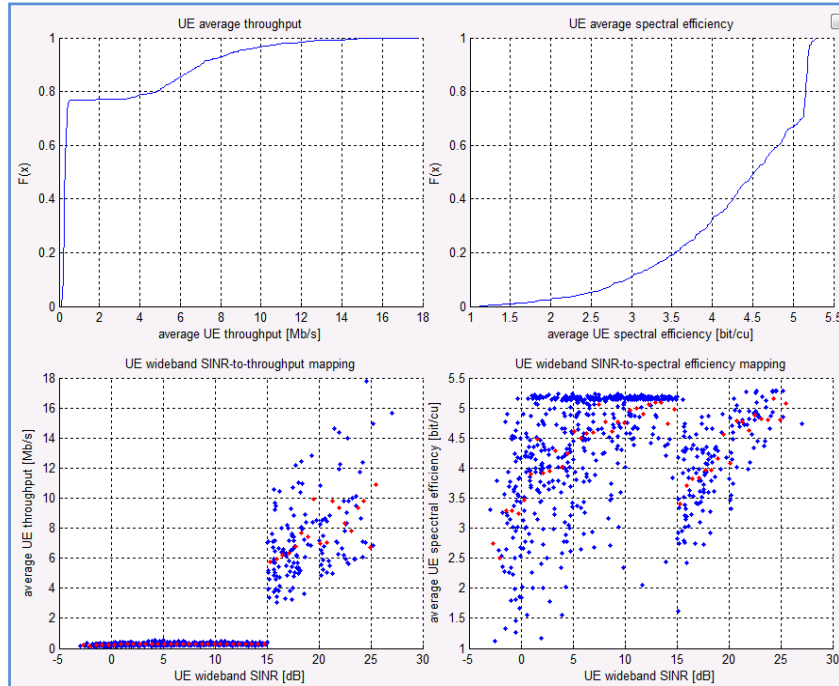


Figura C.15 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 15$ dB con $\beta_{FR}=0.75$.

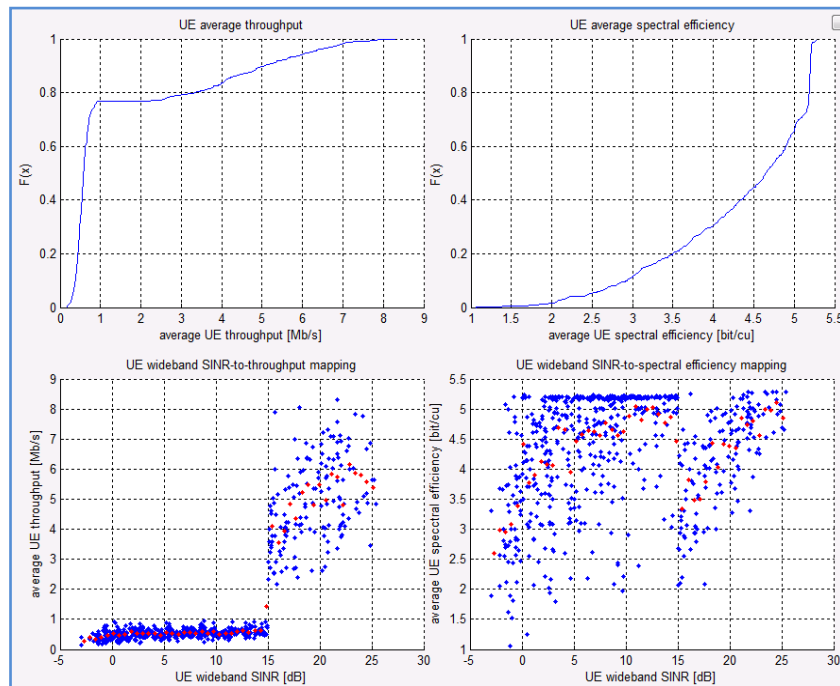


Figura C.16 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 15$ dB con $\beta_{FR}=0.5$.

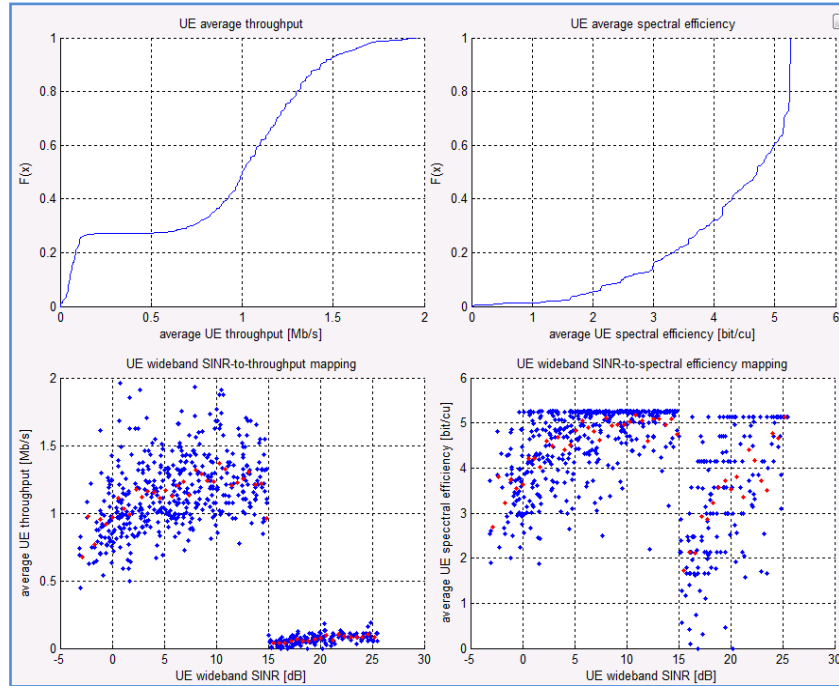


Figura C.17 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 15$ dB con $\beta_{FR}=0.01$.

C.1.5 Resultados para SINR 22.5 dB

Las Figuras C.18, C.19, C.20 y C.21 muestran los diagramas de dispersión y las curvas de Función de Probabilidad Empírica (ECDF) del *Throughput* y la eficiencia espectral para un SINR umbral igual a 22.5 dB, con diferentes variaciones del Ancho de Banda (BW) que se emplean en las zonas de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR).

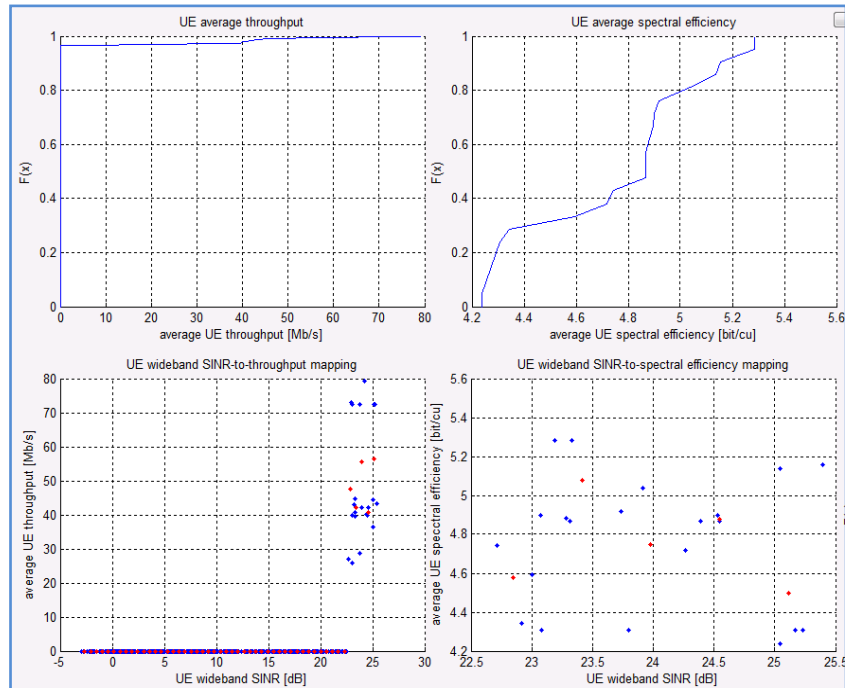


Figura C.18 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 22.5$ dB con $\beta_{FR}=1$.

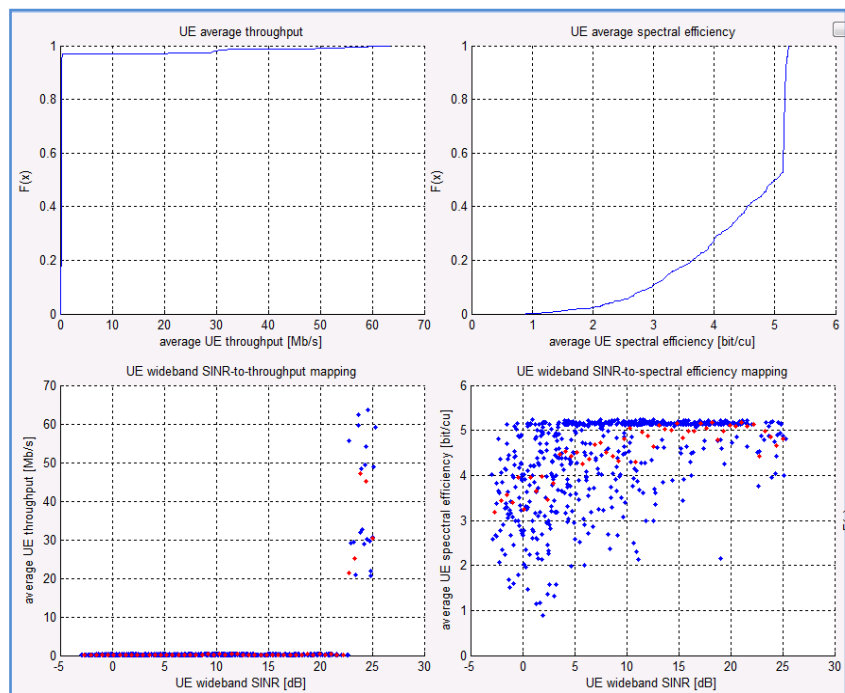


Figura C.19 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 22.5$ dB con $\beta_{FR}=0.75$.

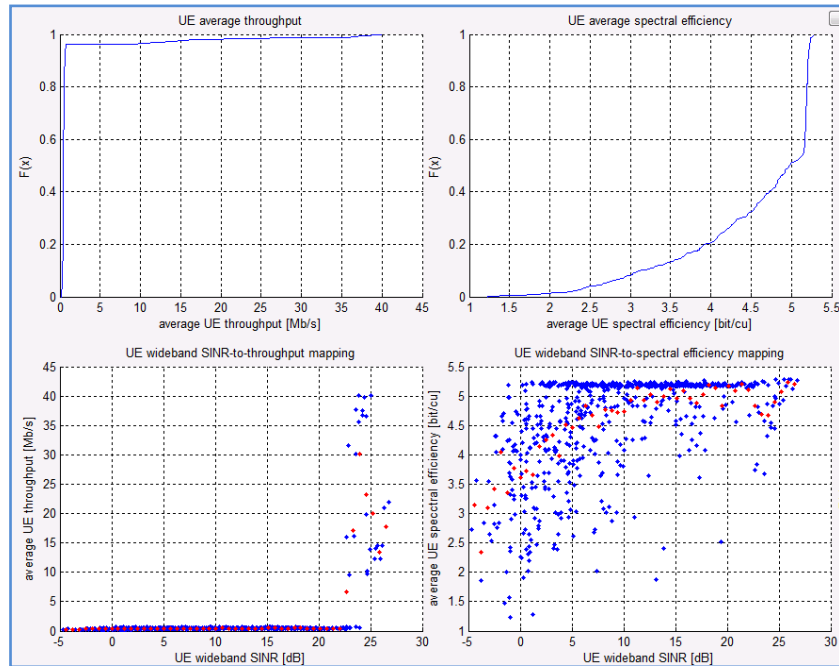


Figura C.20 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 22.5$ dB con $\beta_{FR}=0.5$.

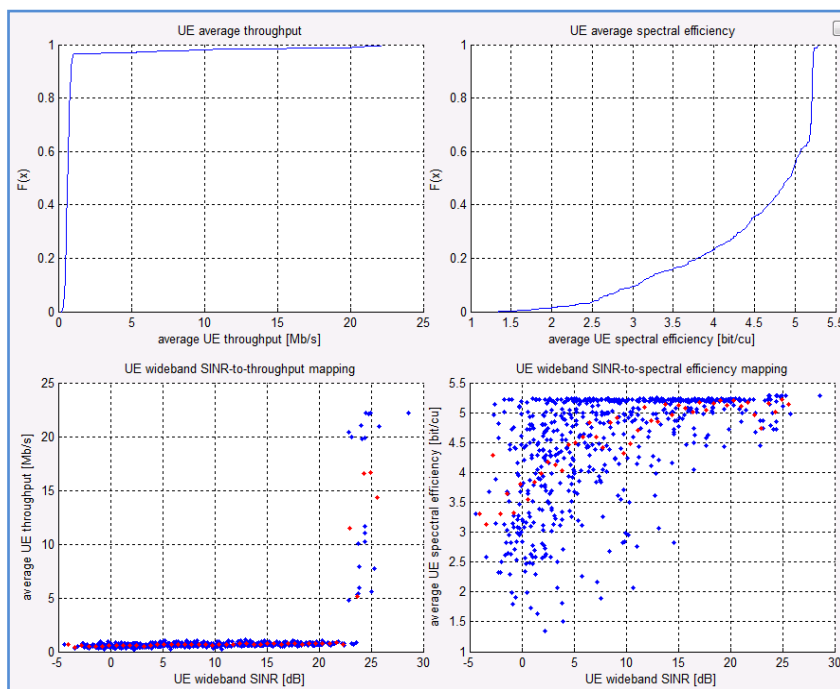


Figura C.21 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 22.5$ dB con $\beta_{FR}=0.25$.



C.2 DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN Y CURVAS DE FUNCIÓN DE PROBABILIDAD EMPÍRICA (ECDF) PARA ROUND ROBIN

C.2.1 Resultados para SINR -2 dB

Las Figuras C.22, C.23, C.24, C.25 y C.26 muestran los diagramas de dispersión y las curvas de Función de Probabilidad Empírica (ECDF) del *Throughput* y la eficiencia espectral para un SINR umbral igual a -2 dB, con diferentes variaciones del Ancho de Banda (BW) que se emplean en las zonas de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR).

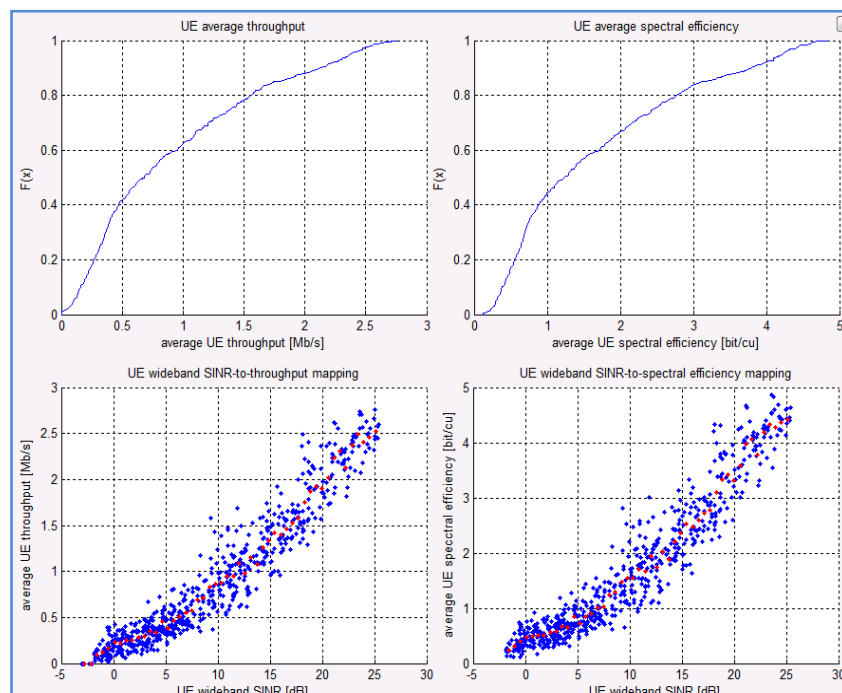


Figura C.22 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = -2$ dB con $\beta_{FR} = 1$.

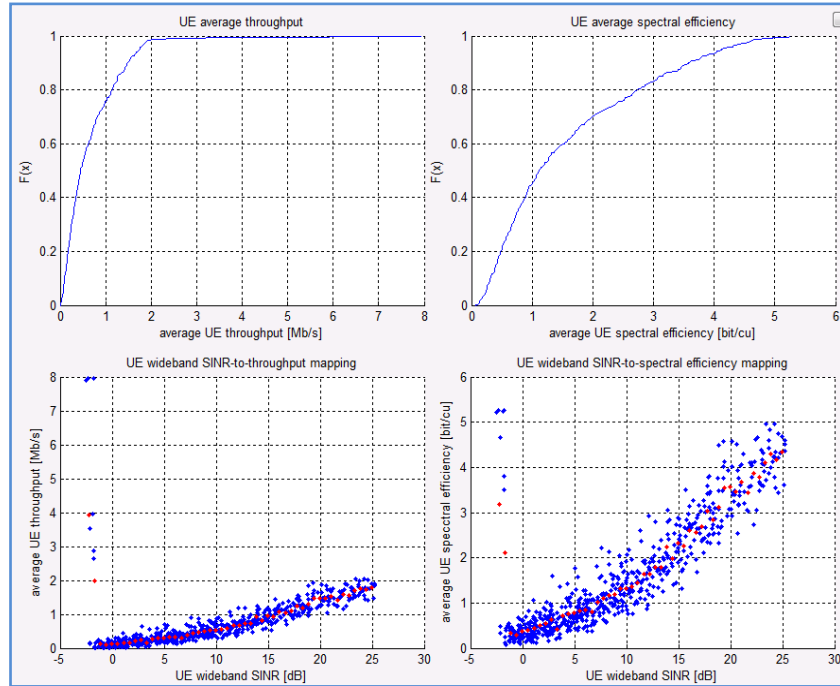


Figura C.23 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = -2$ dB con $\beta_{FR} = 0.75$.

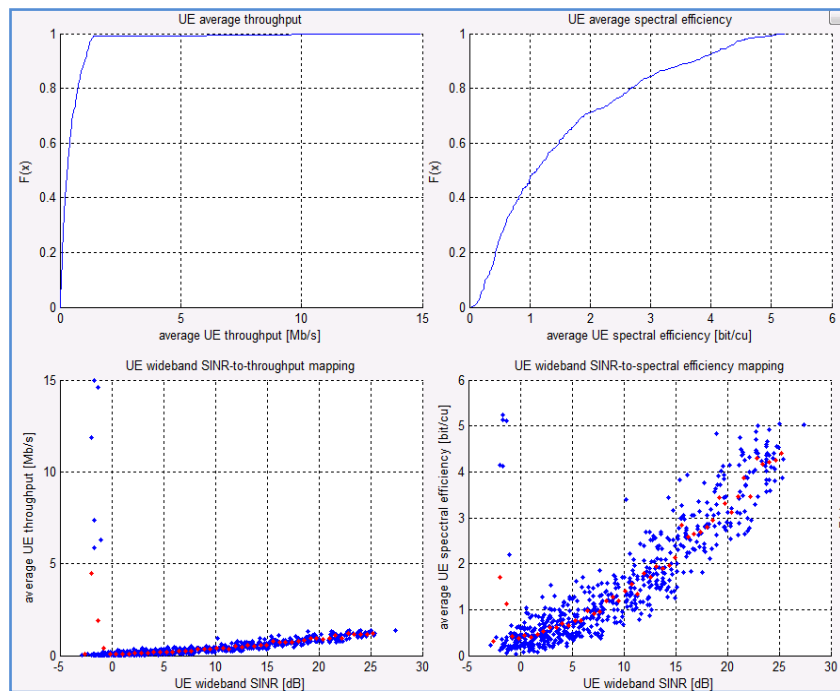


Figura C.24 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = -2$ dB con $\beta_{FR} = 0.5$.

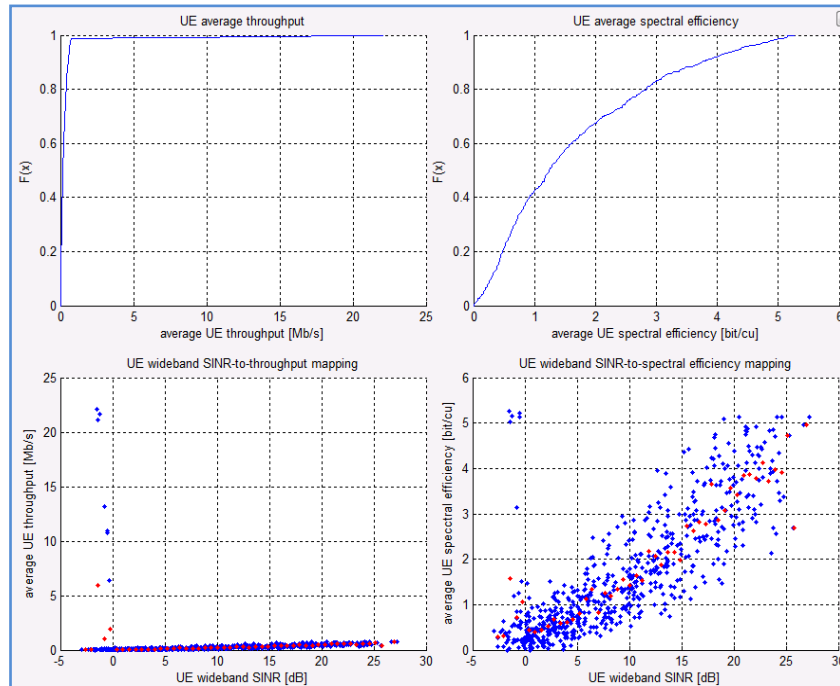


Figura C.25 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = -2$ dB con $\beta_{FR} = 0.25$.

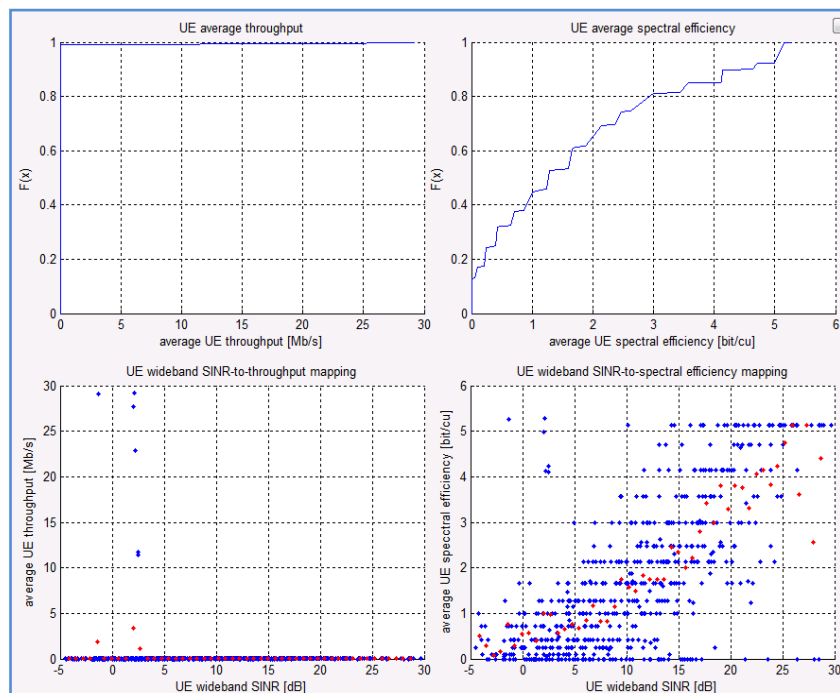


Figura C.26 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = -2$ dB con $\beta_{FR} = 0.01$.



C.2.2 Resultados para SINR 5 dB

Las Figuras C.27, C.28, C.29, C.30 y C.31 muestran los diagramas de dispersión y las curvas de Función de Probabilidad Empírica (ECDF) del *Throughput* y la eficiencia espectral para un SINR umbral igual a 5 dB, con diferentes variaciones del Ancho de Banda (BW) que se emplean en las zonas de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR).

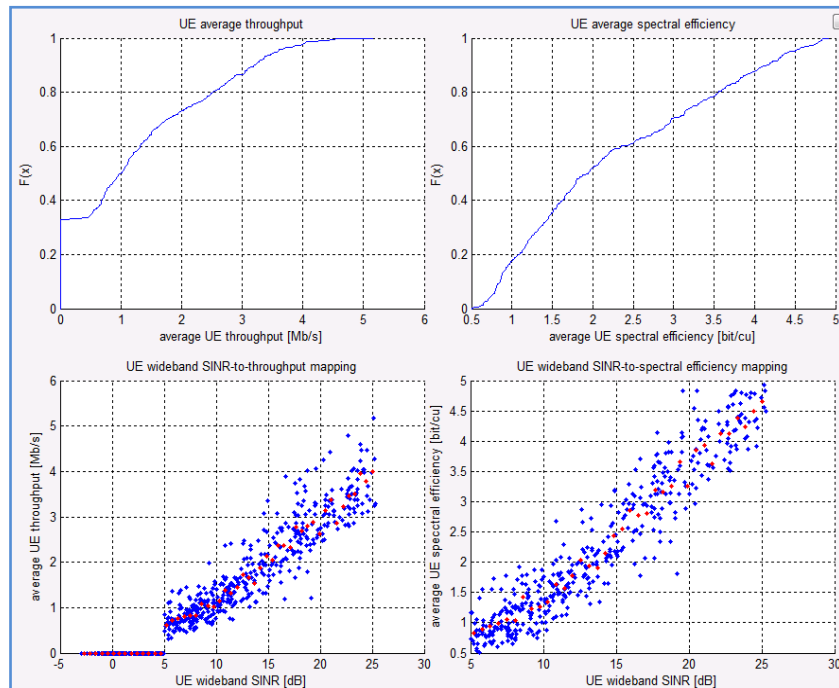


Figura C.27 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 5$ dB con $\beta_{FR}=1$.

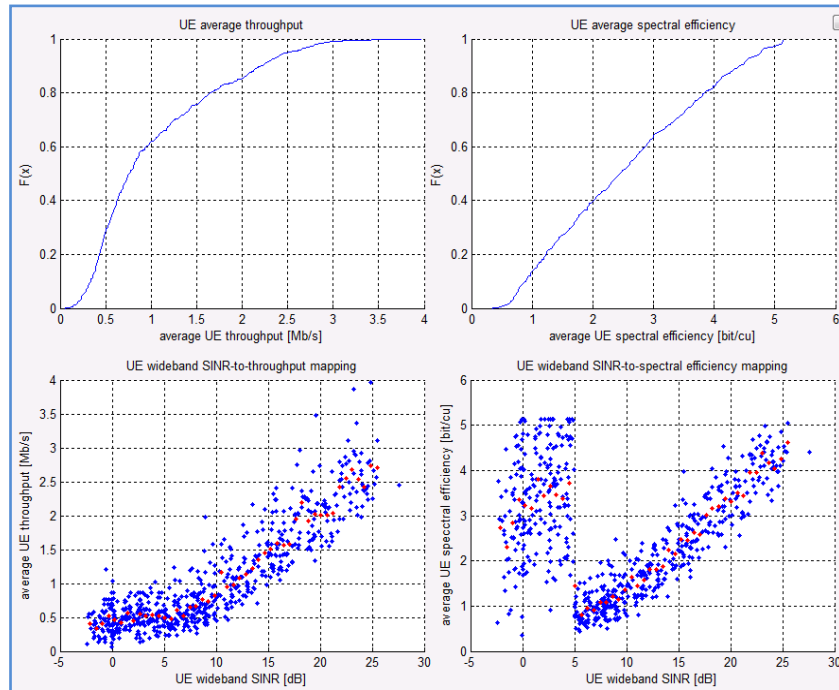


Figura C.28 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=5$ dB con $\beta_{FR}=0.75$.

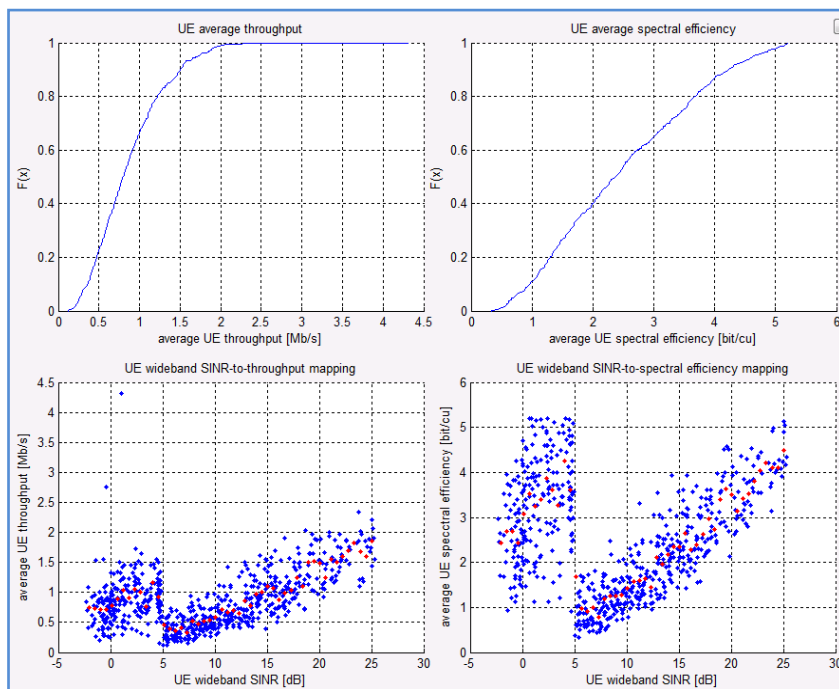


Figura C.29 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=5$ dB con $\beta_{FR}=0.5$.

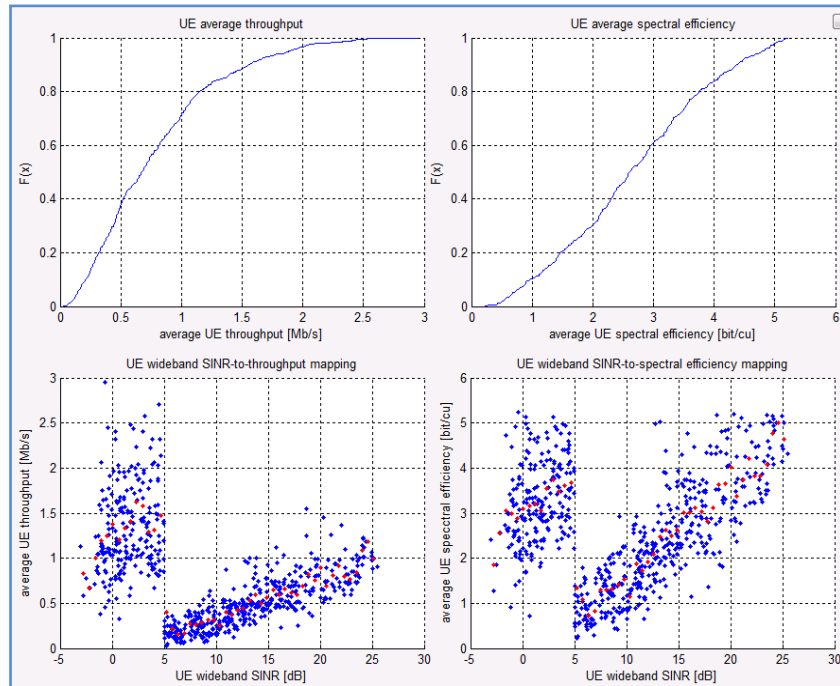


Figura C.30 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=5$ dB con $\beta_{FR}=0.25$.

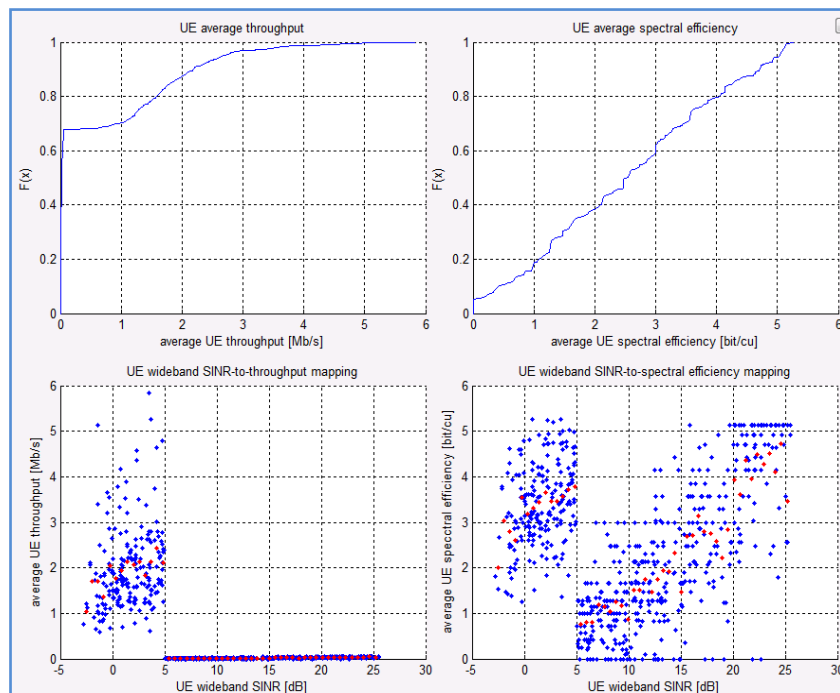


Figura C.31 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}=5$ dB con $\beta_{FR}=0.01$.



C.2.3 Resultados para SINR 10 dB

Las Figuras C.32, C.33, C.34 y C.35 muestran los diagramas de dispersión y las curvas de Función de Probabilidad Empírica (ECDF) del *Throughput* y la eficiencia espectral para un SINR umbral igual a 10 dB, con diferentes variaciones del Ancho de Banda (BW) que se emplean en las zonas de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR).

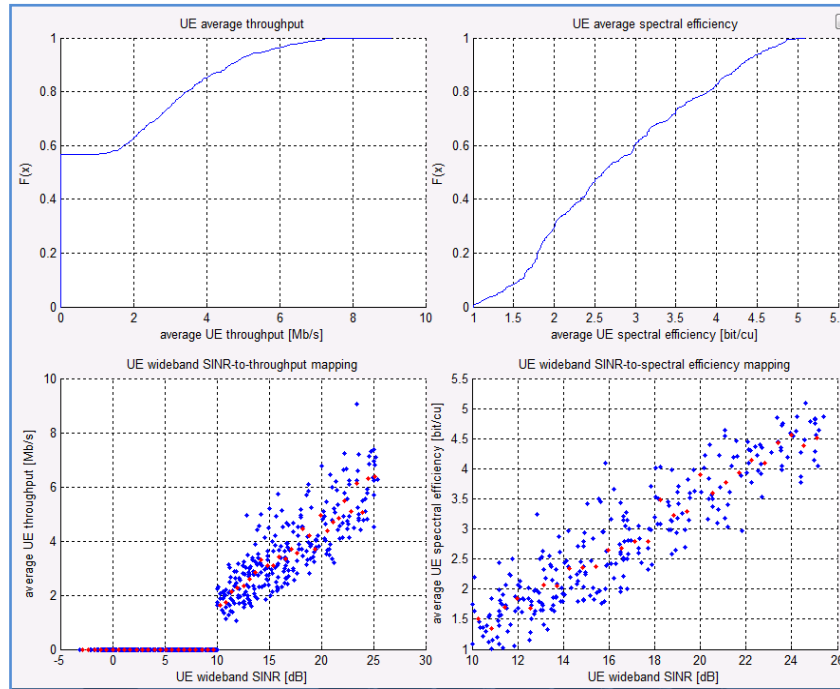


Figura C.32 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 10$ dB con $\beta_{FR}=1$.

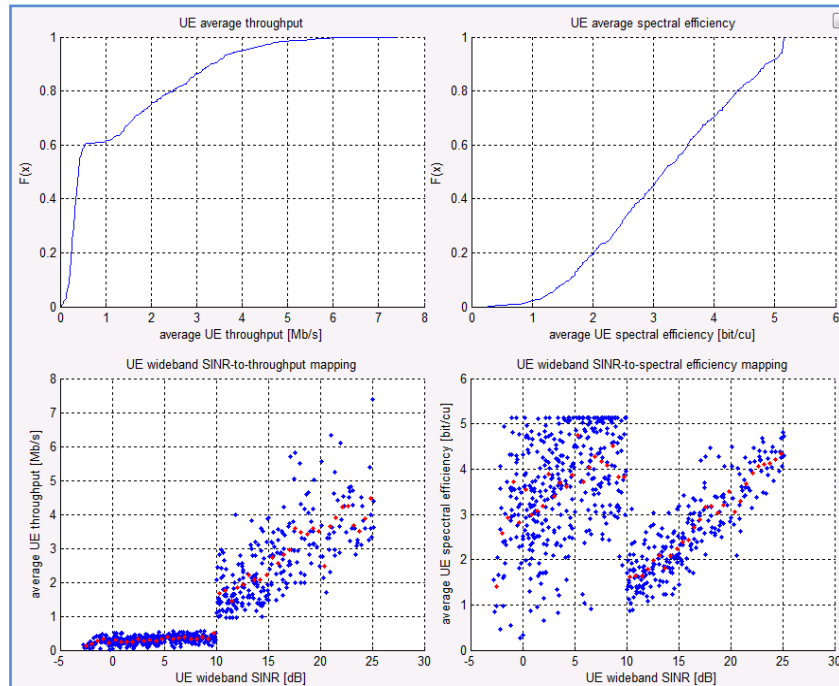


Figura C.33 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 10$ dB con $\beta_{FR}=0.75$.

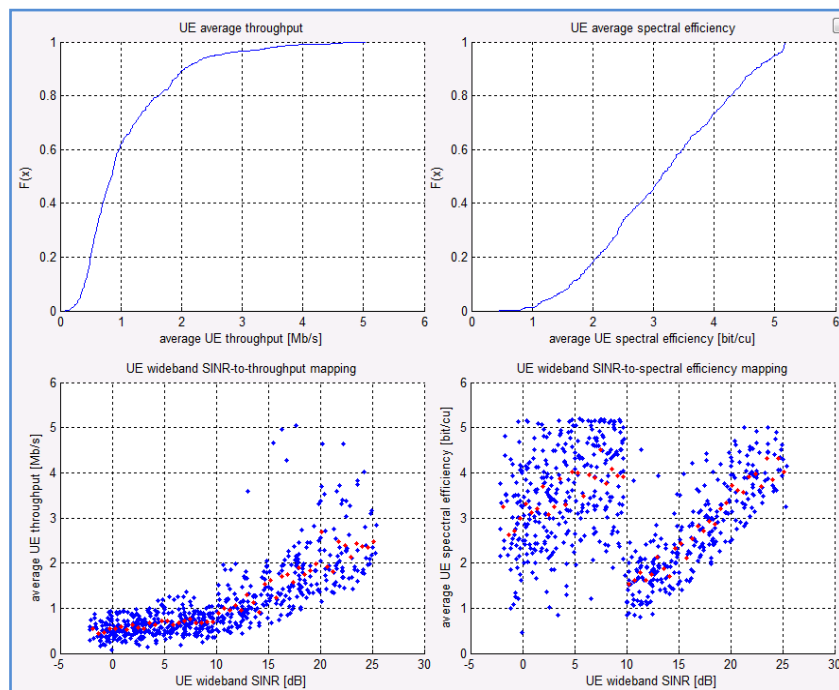


Figura C.34 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 10$ dB con $\beta_{FR}=0.5$.

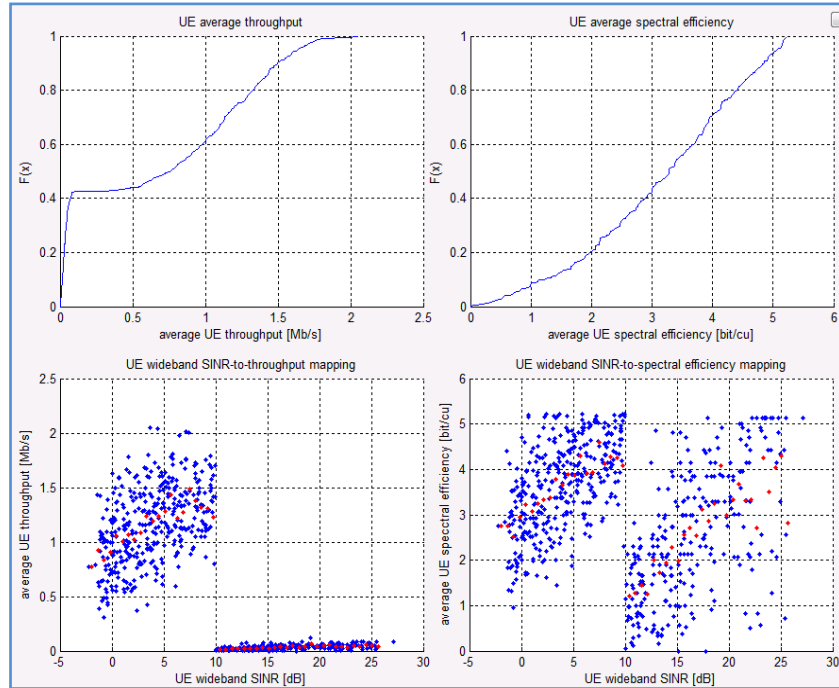


Figura C.35 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 10$ dB con $\beta_{FR}= 0.01$.

C.2.4 Resultados para SINR 15 dB

Las Figuras C.36, C.37, C.38 y C.39 muestran los diagramas de dispersión y las curvas de Función de Probabilidad Empírica (ECDF) del *Throughput* y la eficiencia espectral para un SINR umbral igual a 15 dB, con diferentes variaciones del Ancho de Banda (BW) que se emplean en las zonas de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR).

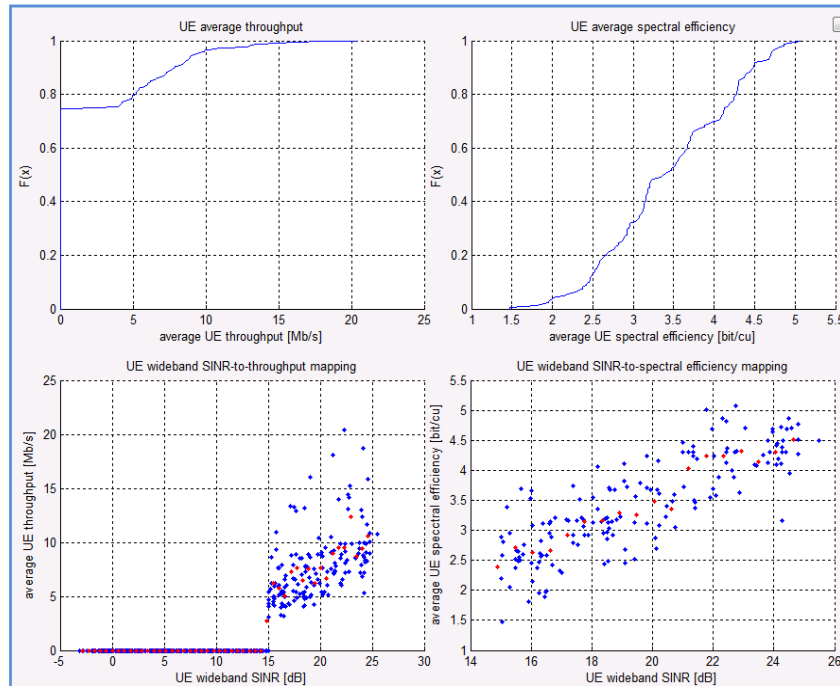


Figura C.36 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 15$ dB con $\beta_{FR}= 1$.

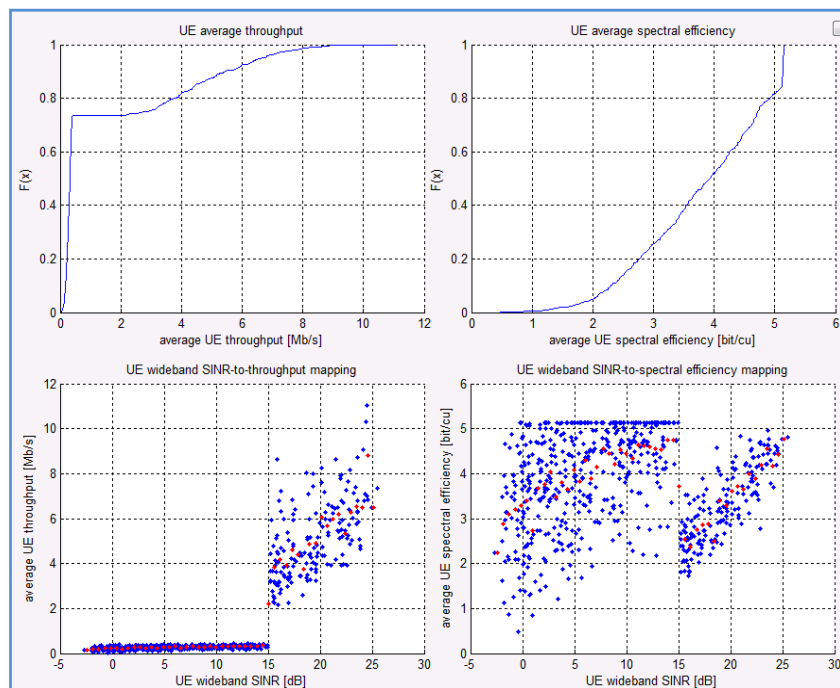


Figura C.37 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 15$ dB con $\beta_{FR}= 0.75$.

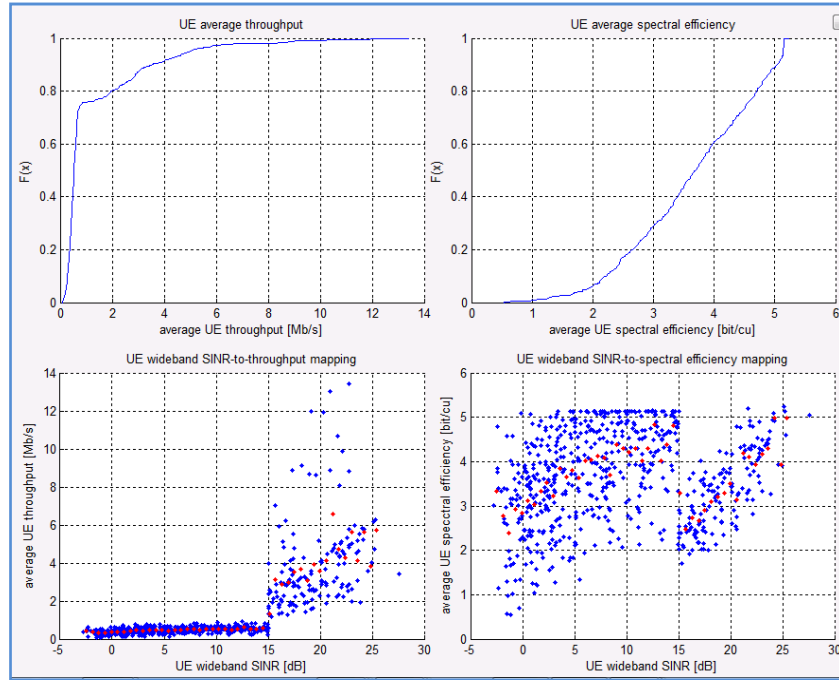


Figura C.38 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 15$ dB con $\beta_{FR}= 0.5$.

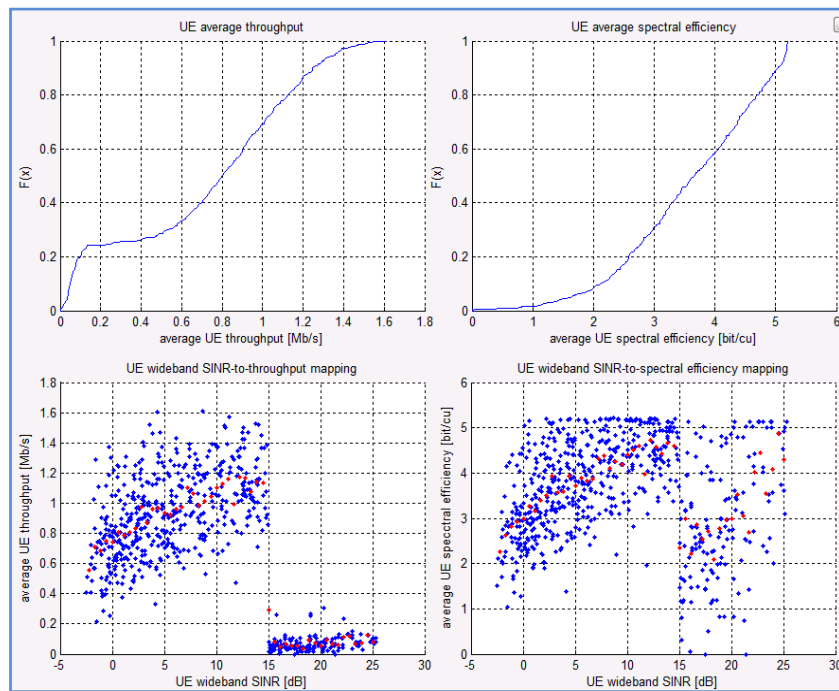


Figura C.39 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 15$ dB con $\beta_{FR}= 0.01$.



C.2.5 Resultados para SINR 22.5 dB

Las Figuras C.40, C.41, C.42 , C.43 y C.44 muestran los diagramas de dispersión y las curvas de Función de Probabilidad Empírica (ECDF) del *Throughput* y la eficiencia espectral para un SINR umbral igual a 22.5 dB, con diferentes variaciones del Ancho de Banda (BW) que se emplean en las zonas de Reuso Completo (FR) y Reuso Parcial (PR).

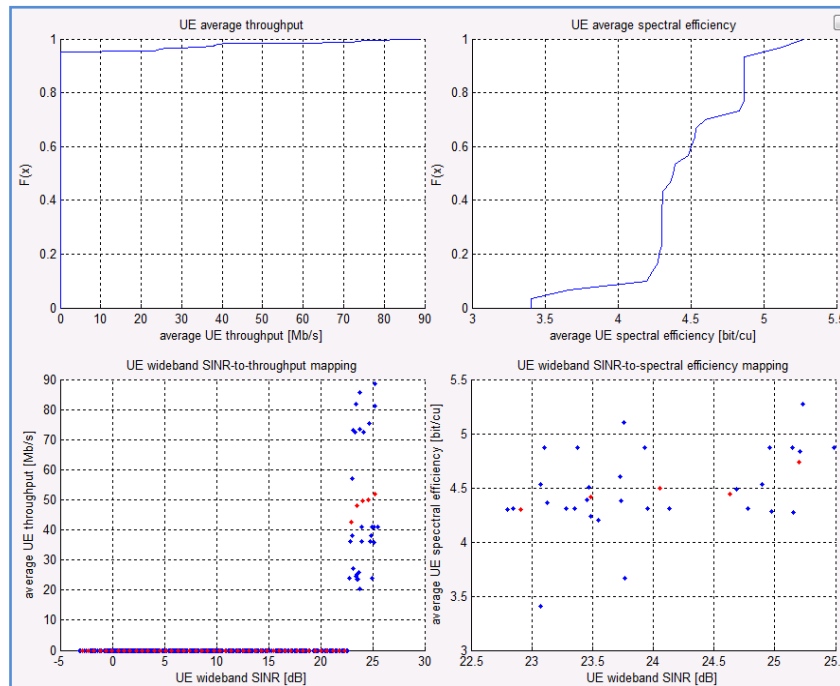


Figura C.40 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = 22.5$ dB con $\beta_{FR} = 1$.

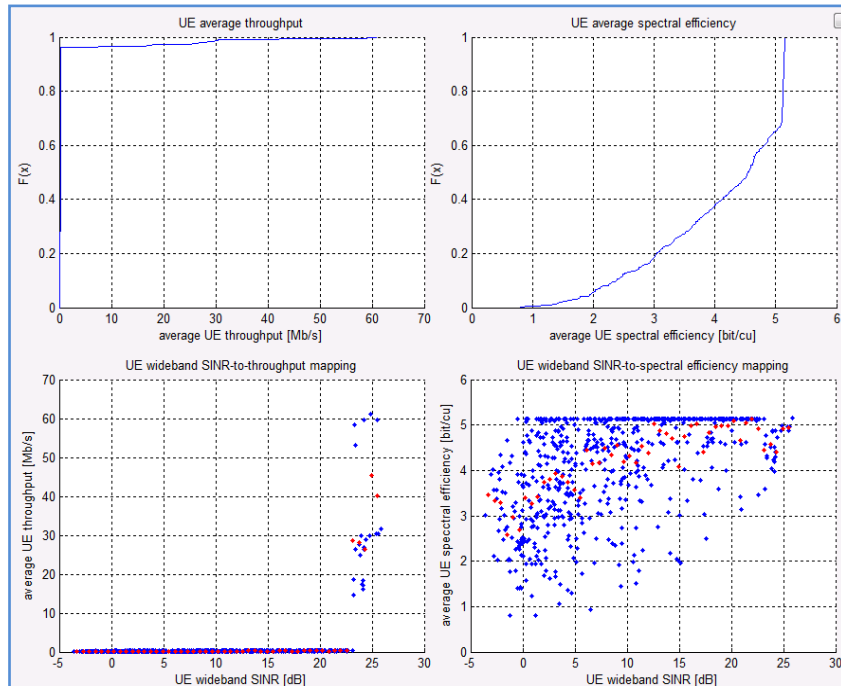


Figura C.41 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 22.5$ dB con $\beta_{FR}= 0.75$.

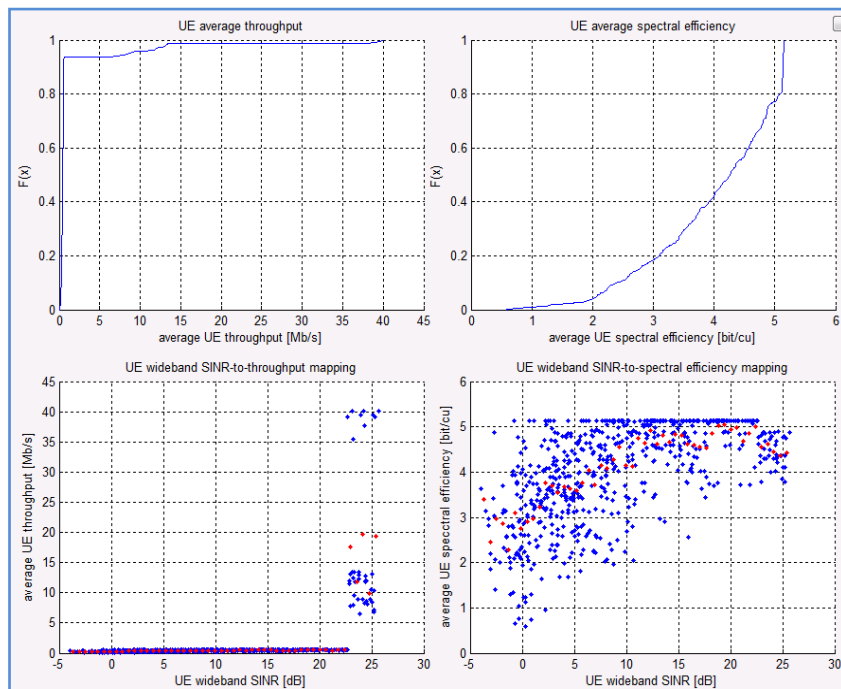


Figura C.42 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr}= 22.5$ dB con $\beta_{FR}= 0.5$.

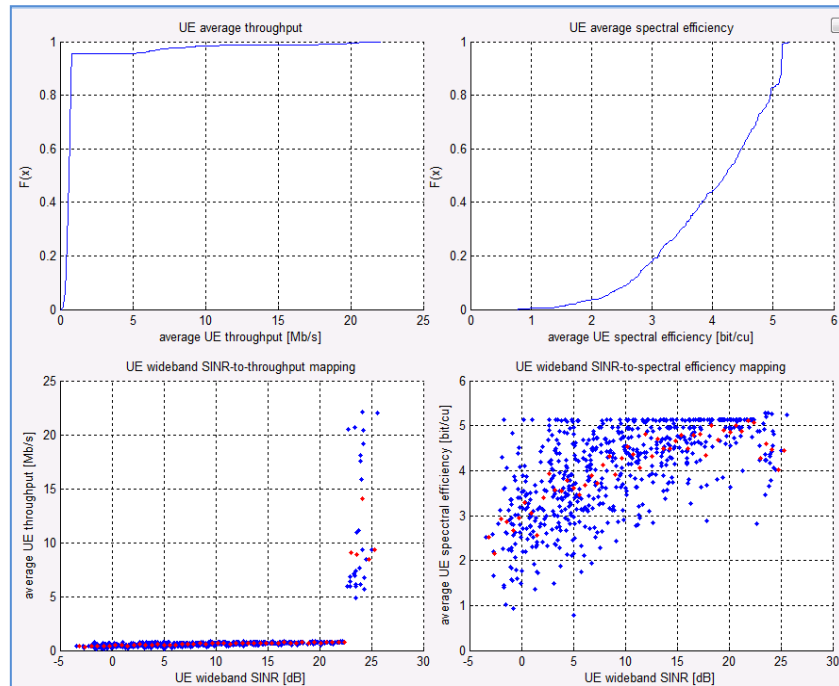


Figura C.43 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = 22.5$ dB con $\beta_{FR} = 0.25$.

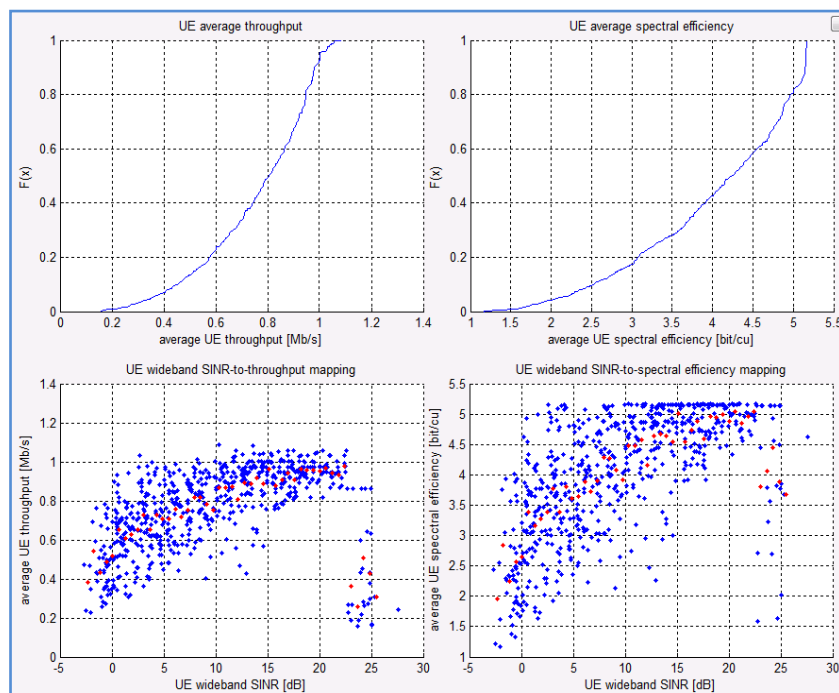


Figura C.44 ECDF y Diagramas de Dispersión para el Escenario $\Gamma_{thr} = 22.5$ dB con $\beta_{FR} = 0.01$.