

ANÁLISIS DE INTERFERENCIA CO-CANAL EN REDES HETEROGÉNEAS



Merly Rocío Martínez Magín
Juan David Valdés Domínguez

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e Inalámbricas-GRIAL
Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Basados en Radio.
Popayán, 2013

ANÁLISIS DE INTERFERENCIA CO-CANAL EN REDES HETEROGÉNEAS



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

**Merly Rocío Martínez Magín
Juan David Valdés Domínguez**

Director
Víctor Manuel Quintero Flórez

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e Inalámbricas-GRIAL
Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Basados en Radio.
Popayán, 2013**



AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

A Dios, por bendecirnos en nuestro camino.

A nuestras familias y amigos por su amor, cariño, apoyo y alegría constante, que nos dan la fortaleza para seguir adelante en la consecución de nuestras metas.

Al Ingeniero Víctor Manuel Quintero Flórez, director de este trabajo de grado, por su constante dedicación, orientación y apoyo.

A los ingenieros del departamento de Telecomunicaciones por sus valiosas orientaciones.



TABLA DE CONTENIDO

1. GENERALIDADES	3
1.1 PEQUEÑAS CELDAS.....	3
1.1.1 Microcelda	5
1.1.2 Picocelda	5
1.1.3 Femtocelda.....	5
1.1.4 WiFi Hotspot 2.0	8
1.2 REDES HETEROGÉNEAS.....	8
1.2.1 Características de Operación.....	15
1.3 FACTORES QUE IMPULSAN LAS REDES HETEROGÉNEAS	21
1.3.1 Calidad	21
1.3.2 Capacidad.....	22
1.3.3 Cobertura y Costos	24
1.3.4 Redes Verdes	25
1.4 REDES AUTO ORGANIZADAS.....	26
1.4.1 Auto Configuración	27
1.4.2 Auto Optimización.....	28
1.4.3 Auto Reparación y Mantenimiento	29
1.5 RADIO COGNITIVA.....	30
1.5.1 Detección de Bandas de Frecuencia que no Están Siendo Utilizadas.....	30
1.5.2 Administración de Bandas de Frecuencia	30
1.5.3 Movilidad Espectral.....	31
1.5.4 Distribución de Bandas de Frecuencia.....	31
2. DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y PLAN DE PRUEBAS DE LA SIMULACIÓN.....	32
2.1 INTRODUCCIÓN.....	32
2.2 METODOLOGÍA DE DESARROLLO	32
2.2.1 Análisis de Requerimientos.....	33



2.2.2 Diseño	35
2.2.3 Implementación.....	43
2.2.4 Escenarios de Pruebas	56
3. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	58
3.1 ESCENARIO 1.....	59
3.1.1 Cien Femtoceldas Desplegadas.	59
3.1.2 Cuatrocientas Femtoceldas Desplegadas.	68
3.2 ESCENARIOS 2 y 3.....	75
3.2.1 Escenario 2.....	76
3.2.2. Escenario 3.....	90
3.3 RUIDO TÉRMICO DESPRECIABLE	97
4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS DE GRADO PROPUESTOS	104
4.1 INTRODUCCIÓN	104
4.2 CONCLUSIONES	104
4.1 TRABAJOS DE GRADO PROPUESTOS	106



APÉNDICES

APÉNDICE 1: ESCENARIO 2- 100 FEMTOCELDAS: ANÁLISIS CON DESVANECIMIENTO LENTO (LOG NORMAL)	107
APÉNDICE 2: ESCENARIO 2- 100 FEMTOCELDAS: ANÁLISIS CON DESVANECIMIENTO RÁPIDO (RAYLEIGH).....	109
APÉNDICE 3. ESCENARIO 2 - 400 FEMTOCELDAS: ANÁLISIS CON DESVANECIMIENTO LENTO (LOG NORMAL)	111
APÉNDICE 4. ESCENARIO 2 - 400 FEMTOCELDAS: ANÁLISIS CON DESVANECIMIENTO RÁPIDO (RAYLEIGH).....	113
APÉNDICE 5. ESCENARIO 3: ANÁLISIS CON DESVANECIMIENTO LENTO (LOG NORMAL)	115
APÉNDICE 6. ESCENARIO 3: ANÁLISIS CON DESVANECIMIENTO RÁPIDO (RAYLEIGH)	117



ANEXOS

ANEXO 1. MODELO DE PROPAGACIÓN DE PENDIENTE ÚNICA	119
ANEXO 2: DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICAS DE LA PROPAGACIÓN RADIOELÉCTRICA	122
ANEXO 2.1: DISTRIBUCIÓN NORMAL DEL CAMPO.....	122
ANEXO 2.2: DISTRIBUCIÓN RAYLEIGH.....	124



LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Cobertura en sistemas celulares.	4
Figura 1.2	Capacidad, cobertura y potencia de las pequeñas celdas.	4
Figura 1.3	Niveles de la arquitectura.	9
Figura 1.4	Arquitectura de red heterogénea.	10
Figura 1.5	Ganancia en la capacidad de la red [bps].	12
Figura 1.6	Cobertura de red con y sin pequeñas celdas.	12
Figura 1.7	Despliegue de femtoceldas vs macroceldas.	13
Figura 1.8	Costo de inversión, operación y mantenimiento de diferentes arquitecturas. .	13
Figura 1.9	Trafico descargado haciendo uso de HetNets.	14
Figura 1.10	Porcentaje de pequeñas celdas desplegadas en diferentes bandas.	15
Figura 1.11	Expansión de cobertura de una pico celda.	18
Figura 1.12	Distribución de población y tráfico mundial para el año 2016.	22
Figura 1.13	Trafico mundial total en redes móviles entre 2007 y 2012.	23
Figura 1.14	Porcentaje de usuarios de comunicación móvil celular.	24
Figura 1.15	incremento de cobertura debido a la evolución de redes homogéneas a redes heterogéneas.	24
Figura 1.16	Estimación de costos de despliegue y puesta en marcha de estaciones base macro y pequeñas celdas.	25
Figura 1.17	Emisión de CO2 en el año.	26
Figura 1.18	Integración de nuevo elemento de red.	27
Figura 1.19	Fases de auto configuración.	28
Figura 2.1	Modelo lineal secuencial.	33
Figura 2.2	Mascota de Scilab dedicada a fomentar el espíritu del software libre para computación numérica.	44
Figura 2.3	Escenario de análisis.	45
Figura 2.4	Escenario de interferencia inter nivel.	46
Figura 2.5	Regiones de coordinación.	50
Figura 2.6	Regiones de coordinación con desvanecimiento.	51
Figura 2.7	Regiones de exclusión dinámica.	53
Figura 2.8	Regiones de exclusión dinámica y control ideal de potencia.	55
Figura 2.9	Regiones de exclusión dinámica y control ideal de potencia.	55
Figura 3.1	Escenario 1 con 100 femtoceldas.	60
Figura 3.2	Histograma de CCI (Log-Normal)	62
Figura 3.3	Histograma de CCI (Rayleigh)	62



Figura 3.4 (a) Función de distribución acumulativa complementaria de la interferencia co-canal percibida por el macro-usuario (MU) con desvanecimiento lento..... 65

Figura 3.4 (b) Función de distribución acumulativa complementaria de la interferencia co-canal percibida por el macro-usuario (MU) con desvanecimiento rápido..... 65

Figura 3.5 Escenario 1 con 400 femtoceldas. 68

Figura 3.6 Histograma de CCI (Log-Normal)..... 70

Figura 3.7 Histograma de CCI (Rayleigh)..... 70

Figura 3.8 (a) Función de distribución acumulativa complementaria de la interferencia co-canal percibida por el macro-usuario (MU) con desvanecimiento lento..... 73

Figura 3.8 (b) Función de distribución acumulativa complementaria de la interferencia co-canal percibida por el macro-usuario (MU) con desvanecimiento rápido..... 73

Figura 3.9 Escenario 2 con 100 femtoceldas. 76

Figura 3.10 Función de distribución acumulativa en el escenario 2 con 100 femtoceldas y SIR objetivo de 0 dB con desvanecimiento lento. 78

Figura 3.11 Función de distribución acumulativa en el escenario 2 con 100 femtoceldas y SIR objetivo de 0 dB con desvanecimiento rápido. 82

Figura 3.12 Escenario 2 con 400 femtoceldas..... 84

Figura 3.13 Función de distribución acumulativa en el escenario 2 con 100 femtoceldas y SIR objetivo de 0 dB con desvanecimiento lento. 86

Figura 3.14 Función de distribución acumulativa en el escenario 2 con 100 femtoceldas y SIR objetivo de 0 dB con desvanecimiento rápido. 88

Figura 3.15 Escenario 3 con densidad de 40 a 400 femtoceldas..... 90

Figura 3.16 Función de distribución acumulativa en el escenario 3 con SIR objetivo de 0 dB y desvanecimiento lento. 92

Figura 3.17 Función de distribución acumulativa en el escenario 3 con SIR objetivo de 0 dB y desvanecimiento rápido. 96

Figura 3.18 (a) Función de distribución acumulativa en el escenario 3 con desvanecimiento rápido sin ruido..... 98

Figura 3.18 (b) Función de distribución acumulativa en el escenario 3 con desvanecimiento rápido más ruido..... 98

Figura 3.19 (a) Función de distribución acumulativa complementaria de la interferencia co-canal sin ruido percibida por el macro-usuario (MU) con desvanecimiento lento. 98

Figura 3.19 (b) Función de distribución acumulativa complementaria de la interferencia co-canal con ruido percibida por el macro-usuario (MU) con desvanecimiento lento. 98

Figura Ap. 1.1 Histograma SIR con interferencia total. 107

Figura Ap. 1.2 Histograma SIR CP 6dB..... 108

Figura Ap. 1.3 Histograma SIR con RED + CP. 108

Figura Ap. 2.1 Histograma SIR con interferencia total. 109

Figura Ap. 2.2 Histograma SIR con CP 6 dB. 109

Figura Ap. 2.3 Histograma SIR con RED + CP. 110



Figura Ap. 3.1	Histograma SIR con interferencia total.	111
Figura Ap. 3.2	Histograma SIR con CP 6 dB.	111
Figura Ap. 3.3	Histograma SIR con RED + CP.	112
Figura Ap. 4.1	Histograma SIR con interferencia total.	113
Figura Ap. 4.2	Histograma SIR con CP 6 dB.	113
Figura Ap. 4.3	Histograma SIR con RED + CP.	114
Figura Ap. 5.1	Histograma SIR con interferencia total.	115
Figura Ap. 5.2	Histograma SIR con CP 6 dB.	115
Figura Ap. 5.3	Histograma SIR con RED + CP.	116
Figura Ap. 6.1	Histograma SIR con interferencia total.	117
Figura Ap. 6.2	Histograma SIR con CP 6 dB.	117
Figura Ap. 6.3	Histograma SIR con RED + CP.	118
Figura An. 2.1	Función de probabilidad (distribución normal).	124
Figura An. 2.2	Función de probabilidad (Rayleigh).	125



LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Parámetros típicos de diferentes tipos de celdas.....	7
Tabla 2.1 Exponente de pérdidas de propagación.....	40
Tabla 2.2 Parámetros macro estación base y femto estación base.....	47
Tabla 2.3 Parámetros generales del sistema.....	47
Tabla 2.4 Plan de pruebas.....	57
Tabla 3.1 Promedio de CCI y moda en el escenario 1 con 100 femtoceldas (Log-Normal).	62
Tabla 3.2 Promedio de CCI y moda en el escenario 1 con 100 femtoceldas (Rayleigh). .	63
Tabla 3.3 Función de distribución acumulativa complementaria vs interferencia co-canal.	67
Tabla 3.4 Promedio de CCI y moda en el escenario 1 con 400 femtoceldas (Log-Normal).	71
Tabla 3.5 Promedio de CCI y moda en el escenario 1 con 400 femtoceldas (Rayleigh). .	71
Tabla 3.6 Función de distribución acumulativa complementaria vs interferencia co-canal.	74
Tabla 3.7 Moda de la SIR con desvanecimiento lento.	77
Tabla 3.8 SIR promedio en el escenario 2 con 100 femtoceldas (Log-Normal).....	78
Tabla 3.9 Distancia entre la macro estación base y macro usuario con 10% probabilidad de degradación.	80
Tabla 3.10 Moda de la SIR con desvanecimiento rápido.	81
Tabla 3.11 SIR promedio en el escenario 2 con 100 femtoceldas (Rayleigh).	82
Tabla 3.12 Distancia entre la macro estación base y macro usuario con 10% de probabilidad de degradación.....	83
Tabla 3.13 Moda de la SIR con desvanecimiento lento.	85
Tabla 3.14 SIR promedio en el escenario 2 con 400 femtoceldas (Log-Normal).....	86
Tabla 3.15 Distancia entre la macro estación base y macro usuario con probabilidad de degradación igual a 10%.	87
Tabla 3.16 Moda de la SIR con desvanecimiento rápido.	88
Tabla 3.17 SIR promedio en el escenario 2 con 400 femtoceldas (Rayleigh).	89
Tabla 3.18 Moda de la SIR con desvanecimiento lento.	91
Tabla 3.19 SIR promedio en el escenario 3 (Log-Normal).	93
Tabla 3.20 Densidad de femtoceldas con 10% de probabilidad de degradación.	94
Tabla 3.21 Moda de la SIR con desvanecimiento rápido.	95
Tabla 3.22 SIR promedio en el escenario 3 (Rayleigh).	96
Tabla 3.23 Densidad de femtoceldas con 10% de probabilidad de degradación.	97



LISTA DE ACRÓNIMOS

2G	Segunda Generación, <i>Second Generation</i> .
3G	Tercera Generación, <i>Third Generation</i> .
4G	Cuarta Generación, <i>Fourth Generation</i> .
3GPP	Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación, <i>3rd Generation Partnership Project</i> .
3GPP2	Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación 2, <i>3rd Generation Partnership Project 2</i> .
VER	Tasa de Error de Bit, <i>Bit Error Rate</i> .
BLER	Tasa de Error de Bloque, <i>Block Error Rate</i> .
CAPEX	Costo de Inversión, <i>Capital Expenditures</i> .
CCDF	Función de Distribución Acumulativa Complementaria, <i>Complementary Cumulative Distribution Function</i> .
CCI	Interferencia Co-canal, <i>Co-channel Interference</i> .
CDF	Función de Distribución Acumulativa, <i>Cumulative Distribution Function</i> .
CDMA	Acceso Múltiple por División de Código, <i>Code Division Multiple Access</i> .
IC/IC	Coordinación de Interferencia Co-canal con Cancelación de Interferencia, <i>Interference Co-channel Coordination / Interference Cancellation</i> .
CoTI	Interferencia en el Mismo Nivel, <i>Co-Tier Interference</i> .
CR	Radio Cognitivo, <i>Cognitive Radio</i> .



CTI	Interferencia Entre Niveles, <i>Cross Tier Interference</i> .
DER	Regiones de Exclusión Dinámica, <i>Dynamic Exclusion Regions</i> .
DL	Enlace de Bajada, <i>Down-Link</i> .
DSL	Línea de Suscriptor Digital, <i>Digital Subscriber Line</i> .
EDGE	Velocidades de Transmisión de Datos Mejoradas para la Evolución de GSM, <i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i> .
EMS	Sistema de Gestión de Elementos, <i>Element Management Systems</i> .
ENPC	Escuela Nacional de Puentes y Calzadas.
ETSI	Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones, <i>European Telecommunications Standards Institute</i> .
EV-DO	Evolución Solo Datos o Evolución y Optimización de Datos, <i>Evolution Data Only or Evolution Data Optimized</i> .
FFR	Reutilización de Frecuencia Fraccional, <i>Fractional Frequency Reuse</i> .
FU	Femto-usuario, <i>Femto-user</i> .
GRIAL	Grupo de Radio e InALámbricas.
GSM	Sistema Global para las Comunicaciones Móviles, <i>Global System for Mobile Communications</i> .
HeNB	Estacion Base Mejorada para Hogar, <i>Home Enhanced Node B</i> .
HETNET	Redes Heterogéneas, <i>Heterogeneous Networks</i> .
HO	Traspaso, <i>Handover</i> .
HSPA	Acceso a Paquetes de Alta Velocidad, <i>High Speed Packet Access</i> .
ICI	Interferencia Inter-Celda, <i>Inter-Cell Interference</i> .
ICIC/IC	Coordinación de Interferencia con Cancelación de Interferencia, <i>Interference Co-channel Coordination / Interference Cancellation</i> .
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> .



IMT-Advanced	<i>Telecomunicaciones Móviles Internacionales - Avanzadas, International Mobile Telecommunications - Advanced.</i>
INRIA	Instituto Francés de Investigación en Informática y Automática.
LTE	Evolución de Largo Término, <i>Long Term Evolution</i> .
LTE- Advanced	Evolución de Largo Término - Avanzado, <i>Long Term Evolution-Advanced</i> .
MCL	Mínimas Pérdidas de Acoplamiento, <i>Minimum Coupling Loss</i> .
MIMO	Múltiples Entradas y Múltiples Salidas, <i>Multiple Input and Multiple Output</i> .
MU	Macro-usuario, <i>Macro-user</i> .
NGMN	Redes Móviles de Nueva Generación, <i>Next Generation Mobile Networks</i> .
OFDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales, <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> .
OPEX	Costos de Operación y Mantenimiento, <i>Operating Expenditures</i> .
PDF	Función de Densidad de Probabilidad, <i>Probability Density Function</i> .
PMR	Radio Móvil Privado, <i>Private Mobile Radio</i> .
PMT	Telefonía Móvil Pública, <i>Public Mobile Telephony</i> .
QoS	Calidad de Servicio, <i>Quality of Service</i> .
RAN	Red de Acceso Radio, <i>Radio Access Network</i> .
RDC	Configuración Dinámica Radio, <i>Dynamic Radio Configuration</i> .
RRM	Gestión de Recursos Radio, <i>Radio Resource Management</i> .
SIM	Módulo de Identificación del Suscriptor, <i>Subscriber Identity Module</i> .
SINR	Relación Señal a Interferencia más Ruido, <i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i> .
SIR	Relación Señal a Interferencia, <i>Signal to Interference Ratio</i> .



SOHO	Pequeñas Oficinas y Oficinas en Casa, <i>Small Office and Home Office</i> .
SON	Redes Auto Organizadas, <i>Self - Organizing Networks</i> .
TDM	Multiplexación por División de Tiempo, <i>Time Division Multiplexing</i> .
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones, <i>International Telecommunication Union</i> .
UIT-T	Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de ITU, <i>ITU Telecommunication Standardization Sector</i> .
UL	Enlace de Subida, <i>Up-Link</i> .
UMB	Ultra Banda Ancha Móvil, <i>Ultra Mobile Broadband</i> .
UMTS	Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universal, <i>Universal Mobile Telecommunications System</i> .
USIM	Modulo Universal de Identificación del Subscriptor, <i>Universal Subscriber Identity Module</i>
WFA	Alianza WiFi, <i>Wi-Fi Alliance</i> .
WiFi	Fidelidad Inalámbrica, <i>Wireless Fidelity</i> .
WiMAX	Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas, <i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> .



GLOSARIO

EVOLUCIÓN DE LARGO TÉRMINO: estándar para la comunicación inalámbrica de datos de alta velocidad para teléfonos móviles y terminales de datos. Es la evolución de tecnologías como: Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (GSM, *Global System for Mobile Communications*), Velocidades de Transmisión de Datos Mejoradas para la Evolución de GSM (EDGE, *Enhanced Data Rates for GSM Evolution*), Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universal (UMTS, *Universal Mobile Telecommunications System*) y Acceso a Paquetes de Alta Velocidad (HSPA, *High Speed Packet Access*). El estándar ha sido desarrollado por el Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (3GPP, *3rd Generation Partnership Project*) y especificado a través del Release 8.

EVOLUCIÓN DE LARGO TÉRMINO – AVANZADO: estándar de comunicación móvil presentado oficialmente como un candidato para sistemas de Cuarta Generación (4G, *Fourth Generation*) ante el Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de ITU (UIT-T, *ITU Telecommunication Standardization Sector*) a finales de 2009, especificado por el 3GPP, aprobado por la *Unión Internacional de Telecomunicaciones* (UIT, *International Telecommunication Union*), e incluido como una de las tecnologías para las Telecomunicaciones Móviles Internacionales – Avanzadas (IMT-Avanzadas, *International Mobile Telecommunications - Advanced*) a través del Release 10.

EVOLUCIÓN DE SOLO DATOS: estándar para la comunicación inalámbrica de datos, normalmente para el acceso a Internet de banda ancha. Utiliza la técnica de Acceso Múltiple por División de Código (CDMA, *Code Division Multiple Access*), así como la Multiplexación por División de Tiempo (TDM, *Time Division Multiplex*) para maximizar el desempeño global del sistema y mejorar la percepción por parte de los usuarios. Especificado por el Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación 2 (3GPP2, *3rd Generation Partnership Project 2*) como parte de la familia de estándares CDMA2000 y ha sido adoptado por muchos proveedores de servicios de comunicación móvil celular en todo el mundo, especialmente aquellos que emplean redes CDMA. También es utilizado por la red de comunicación celular satelital Globalstar.

REDES HETEROGÉNEAS: término que hace referencia al uso e interacción de múltiples tipos de nodos de acceso en una red inalámbrica. Una red de área amplia puede utilizar



macroceldas, microceldas, picoceldas, y/o femtoceldas, para brindar cobertura en diferentes tipos de escenarios. HetNet es una red de interacción compleja entre macroceldas, microceldas, picoceldas y femtoceldas de sistemas de comunicación móvil celular, y en algunos casos con elementos de la red de Fidelidad Inalámbrica (WiFi, Wireless Fidelity) utilizados en conjunto para brindar una mejor cobertura con capacidad de traspaso entre las diferentes redes [1].

HOME NODE B: es el término utilizado por 3GPP para una estación base femtocelular. Un nodo B es un elemento de la Red de Acceso Radio (RAN, *Radio Access Network*). Una femtocelda ejecuta las funciones de un nodo B, pero es optimizada para despliegues en oficina y hogar.

REDES AUTO ORGANIZADAS: la visión de las Redes Auto-Organizadas (SON, *Self-Organizing Networks*), en concordancia con la visión de 3GPP y las Redes Móviles de Nueva Generación (NGMN, *Next Generation Mobile Networks*) es hacer más fácil las tareas de planificación, configuración, administración, optimización y asignación de recursos en las redes de acceso radio del futuro [2].

BACKHAUL: enlace de interconexión entre el núcleo de red (*Backbone*) y las sub redes de datos de comunicación móvil celular.

PEQUEÑAS CELDAS (SMALL CELLS): término utilizado por 3GPP para puntos de acceso inalámbricos de baja potencia que operan en espectros licenciados. Proporcionan una mejor cobertura, capacidad y calidad de servicios de comunicación móvil celular.

INTERFERENCIA CO-CANAL: se define como la señal interferente generada por usuarios móviles o estaciones base en distintas celdas, que operan en la misma frecuencia portadora.

INTRODUCCIÓN

Históricamente la arquitectura de red concebida para las diferentes tecnologías inalámbricas que han surgido a través del tiempo ha sido homogénea, diseñada e implementada para brindar servicio con cobertura y capacidad de manera uniforme, utilizando elementos de red con parámetros muy similares, desde tecnologías como GSM hasta Acceso de Paquetes de Alta Velocidad (HSPA, *High-Speed Packet Access*). Pero actualmente y en particular con el desarrollo de la tecnología Evolución de Largo Término (LTE, *Long Term Evolution*) (3GPP Release 8) y la imperiosa necesidad de cumplir con ciertos requerimientos de Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*), cobertura y capacidad, ha obligado a la evolución de la arquitectura de red convencional, impulsando el cambio de una arquitectura homogénea a una nueva idea de arquitectura de red denominada Redes Heterogéneas (HetNet, *Heterogeneous Networks*), la cual contempla la introducción de pequeñas celdas en la arquitectura de red convencional, y en particular Estaciones Base Mejoradas para Hogar (HeNB, *Home Enhanced Node B*), incrementando la capacidad, la cobertura y la calidad de una red móvil celular; dependiendo principalmente de la cantidad de pequeñas celdas introducidas en el sistema.

Sin embargo, la interferencia generada por la integración e interacción de varios nodos de servicio de diferente clase en un mismo escenario, limitan la capacidad, cobertura y calidad de servicio que puede ser alcanzada idealmente por la red. Por lo tanto la interferencia co-canal se convierte en un factor crítico a controlar de manera inteligente en una red heterogénea. Por esta razón, en el presente trabajo de grado se desarrolló una simulación básica estática a nivel de sistema, mediante la cual se analizó la interferencia co-canal y la probabilidad de degradación de servicio en una red heterogénea, caracterizada principalmente por la interacción de una macro estación base y estaciones base para hogar en un entorno microcelular urbano, y cómo ella es afectada por la integración de diferentes mecanismos de control de interferencia co-canal.

El presente documento está estructurado de la siguiente forma: El primer capítulo presenta una descripción general de conceptos como: pequeñas celdas, redes heterogéneas y sus características fundamentales y distintas técnicas que ayudan a controlar la interferencia; en el segundo capítulo se presenta el diseño y la implementación de una simulación estática a nivel de sistema que permite visualizar los



efectos de la interferencia co-canal en una red heterogénea; en el tercer capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos; y en el cuarto capítulo se resumen las conclusiones y se plantean posibles líneas futuras de investigación.



1. GENERALIDADES

1.1 PEQUEÑAS CELDAS

Dependiendo de la calidad de servicio, capacidad¹ y cobertura demandados en cierta área de servicio específica, la arquitectura de una red de comunicación móvil celular de banda ancha debe adaptarse y optimizarse adicionando o suprimiendo elementos de red, y así, incrementar el desempeño de la red y satisfacer las necesidades de los usuarios. De esta forma se han establecido diferentes tipos de celdas: macrocelda, microcelda, picocelda y femtocelda. Cada uno de estos tipos de celdas se diferencian unos de otros por el área de cobertura (potencia de transmisión y tipo de antena), y cantidad de usuarios que puede servir, entre otros.

En escenarios en los cuales se despliegan macro estaciones base, los recursos de estas tienen que ser compartidos por un considerable número de usuarios que se encuentra dentro de su área de cobertura, lo que adicionado a las condiciones del canal radio no permite que los usuarios móviles logren altas velocidades de transmisión de datos. Al implementar pequeñas celdas como: micro estaciones base, pico estaciones base y femto estaciones base, siendo estas últimas puntos de acceso inalámbricos de baja potencia que operan en espectros licenciados, las cuales pueden ofrecer los mismos recursos que una macro estación base pero a un menor número de usuarios y en unas mejores condiciones de canal, proporcionando mejor cobertura y mayores velocidades de transmisión de datos, siempre y cuando se realice una gestión inteligente de recursos radio, lo cual permite incrementar la calidad de servicio y el desempeño general de la red de comunicación móvil celular a un costo razonable tanto de inversión como de operación.

La figura 1.1 [3] permite apreciar de manera general el área de servicio y escenario de despliegue de cada una de las diferentes celdas, comenzando por las pequeñas celdas: femtocelda, picocelda y microcelda y por último la macrocelda tradicional.

¹ Capacidad, se entiende por capacidad como el número máximo de usuarios atendidos por el sistema o la máxima velocidad de transmisión de datos lograda por un dispositivo móvil.

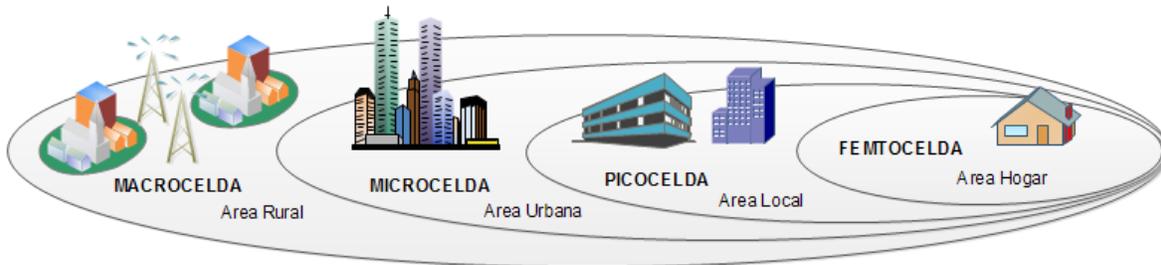


Figura 1.1 Cobertura en sistemas celulares.

La figura 1.2 [4] presenta los beneficios que puede brindar la integración de pequeñas celdas a las arquitecturas de las redes actuales, ilustrando cómo el despliegue de las diferentes pequeñas celdas incrementa la capacidad de la red y disminuye la potencia de transmisión requerida en la medida en que se despliega una mayor cantidad de pequeñas celdas. Por ejemplo, la capacidad de la red se incrementa en 10 veces adicionando micro o pico estaciones base que trabajan con una potencia máxima de 5W (35 W menos que la macro estación) y la capacidad aumenta en 1,000 veces en un escenario de interiores (*indoor*) utilizando femto estaciones base en comparación con el despliegue de una macro estación base.

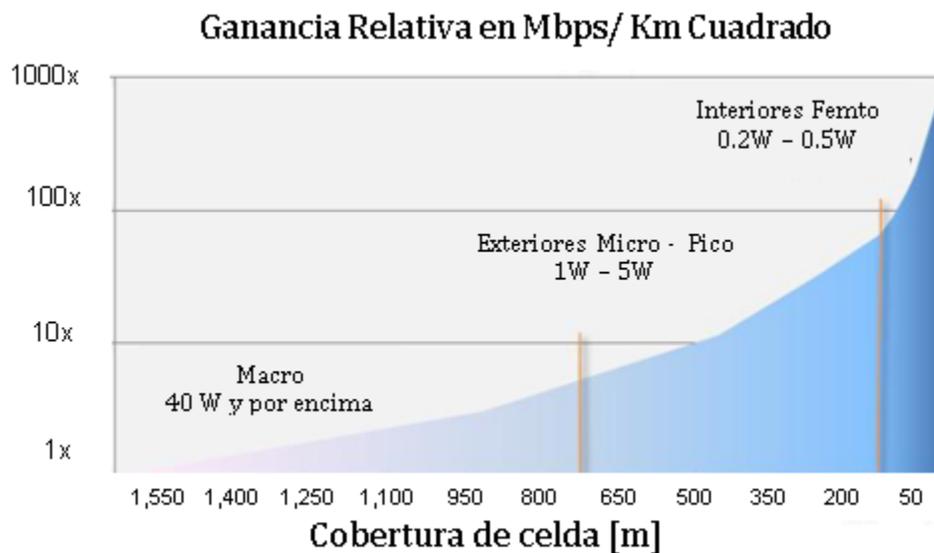


Figura 1.2 Capacidad, cobertura y potencia de las pequeñas celdas.

Las pequeñas celdas se pueden clasificar según sus características de cobertura, capacidad y finalidad de la siguiente manera:



1.1.1 Microcelda

Este tipo de pequeñas celdas son consideradas Estaciones Base de Cobertura Media (*Medium Range Base Stations*) configuradas manual o automáticamente, desplegadas en escenarios de exteriores en ambientes urbanos, con potencias de transmisión de hasta 5 W (37 dBm). Logran un área de cobertura entre 100 m y 200 m de radio y son diseñadas para servir a cientos de usuarios, aproximadamente de 128 a 256 usuarios [5] [6].

1.1.2 Picocelda

Este tipo de pequeñas celdas son consideradas Estaciones Base de Cobertura Local (*Local Area Base Stations*) configuradas manual o automáticamente para servicios de voz y datos, desplegadas en escenarios de exteriores o interiores en ambientes urbanos, dependiendo del objetivo requerido, por ejemplo, pueden ser desplegadas en centros comerciales, edificios empresariales y edificios de gran altura donde la señal proporcionada por la macro estación base no llega con el nivel suficiente. La potencia de transmisión utilizada es de 250 mW hasta de 1 W (24 dBm hasta 30 dBm), sin embargo el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*) y el 3GPP recomiendan por medio de reportes técnicos [7] mantener la potencia de transmisión de la pico celda por debajo de 100 mW (20 dBm), disminuyendo la interferencia y aumentando la capacidad de la red cuando se integran picoceldas y microceldas en un mismo escenario [8] [9]. Logra un área de cobertura entre 20 m y 100 m de radio y son diseñadas para servir entre 64 y 128 usuarios.

1.1.3 Femtocelda

Teniendo en cuenta que 2 de 3 llamadas y alrededor del 90% del tráfico de datos ocurre en interiores (*indoors*) [10], este tipo de pequeñas celdas han sido desarrolladas como estaciones base de baja potencia, bajo costo y fácil integración y conexión, diseñadas para proporcionar cobertura y conexión a dispositivos móviles en escenarios de interiores, como lo son Pequeñas Oficinas y Oficinas en Casa (SOHO, *Small Office and Home Office*) y hogares de los usuarios, beneficiando tanto al usuario como al proveedor del servicio, disminuyendo el número de usuarios por antena y aumentando la proximidad de la misma al usuario final, mejorando las condiciones del canal y con ello la velocidad de transmisión de datos, la calidad de los servicios y la cobertura del sistema. Existen dos tipos de femtoceldas: la residencial, la cual tiene una potencia de transmisión de 20 mW (13 dBm), proporcionando un área de cobertura de alrededor de 10 m de radio con capacidad de servir simultáneamente de 3 a 5 usuarios; y la empresarial, la cual tiene



una potencia de transmisión de aproximadamente 200 mW (23 dBm), proporcionando un área de cobertura de alrededor de 30 m de radio con capacidad de servir de 8 a 16 usuarios [9] [11] [12] [13].

Una característica importante de las femtoceldas es la utilización en la infraestructura de la red de transporte (*backhaul*) medios como: Línea de Suscriptor Digital (DSL, *Digital Subscriber Line*), conexiones banda ancha por cable, fibra óptica o tecnologías inalámbricas de última milla, para mejorar el desempeño de la red [14].

Existen diferentes métodos de acceso a la femtocelda:

1. Acceso abierto: todos los usuarios tienen autorización de acceder a la femtocelda siempre y cuando pertenezcan a la red de un operador determinado. Este tipo de acceso provee un aumento considerable en la capacidad de la red, ya que en el caso de un usuario conectado a una macro estación base con bajo nivel de señal, éste podría conectarse a cualquier femtocelda de acceso público que este cerca, reduciendo el uso de recursos radio (potencia y ancho de banda) de la macro estación base, incrementando el desempeño general de la red. Sin embargo, debido a que los usuarios de femtoceldas deben pagar tanto por el uso de la red móvil como el acceso a internet utilizado para la red de transporte (*backhaul*), este tipo de acceso no es muy común en hogares. Por otra parte la posibilidad de cualquier usuario de acceder a cualquier femtocelda, genera un aumento considerable de Traspasos (HO, *Handover*) y señalización.
2. Acceso cerrado: solo usuarios previamente registrados en la femtocelda tienen autorización de acceder a la red. Este tipo de acceso permite mejorar el desempeño de la red, sin embargo, el hecho de que la femtocelda solo permita el acceso a limitados usuarios, probablemente cause interferencia a usuarios que no estén registrados en ella o estén conectados a una macro estación base o a otra pequeña celda.
3. Acceso híbrido: se integran los dos tipos de accesos anteriores (abierto y cerrado), autorizando en todo momento la conexión a la femtocelda a usuarios previamente registrados en ésta, pero reservando una cantidad de recursos radio determinados para que los usuarios no registrados pertenecientes a la red móvil puedan acceder.



Beneficios de una femtocelda:

- Incremento de calidad, capacidad y cobertura de una red.
- Reducción de recursos radio usados en el nivel macro.
- Reducción de número de usuarios atendidos por las estaciones base convencionales.
- Reducción del Costo de Operación y Mantenimiento (OPEX², *Operating Expenditures*) y Costo de inversión (CAPEX³, *Capital Expenditures*) de la red.
- Mayor movilidad.
- Mayor calidad de servicios ofrecidos en ambientes de interiores.

La tabla 1.1 [8] [10] presenta un resumen comparativo de parámetros de los diferentes tipos de celdas:

	Macrocelda	Microcelda	Picocelda	Femtocelda	
				Empresarial	Hogar
Potencia de Transmisión	46 dBm	37 dBm	24 - 30 dBm	23 dBm	13 dBm
Ganancia de Antena	14 dBi	5 dBi	4 dBi	0 dBi	0 dBi
Radio de Cobertura	1.5 Km	100 – 200 m	20 – 100 m	30 m	10 m
Ubicación	Exteriores	Exteriores	Exteriores e Interiores	Interiores	Interiores
Número de Usuarios	-	128 – 256	64 - 128	8 – 16	3 – 5
Costo	Por encima de \approx 100,000 dólares	\approx 150 dólares	\approx 250 dólares	\approx 150 dólares	\approx 100 dólares

Tabla 1.1 Parámetros típicos de diferentes tipos de celdas.

² OPEX, gastos permanentes de operación, mantenimiento y de funcionamiento de un producto, negocio o sistema.

³ CAPEX, inversiones de capital que generan beneficio para la compañía. Se utilizan en la compra o mejora de activos no corrientes.



1.1.4 WiFi Hotspot 2.0

Estos dispositivos han sido diseñados y desarrollados por la Alianza WiFi (WFA, *Wi-Fi Alliance*), los cuales permiten, al igual que las micro, pico y femtoceldas, brindar servicio a usuarios de banda ancha móvil, incrementando considerablemente la movilidad, capacidad y cobertura de una red en general.

Estos dispositivos siguen las siguientes especificaciones IEEE [15]:

- IEEE 802.11u, el cual permite la identificación de la red WiFi y la conexión automática.
- IEEE 802.11i, el cual brinda encriptación y seguridad.
- IEEE 802.1X, el cual permite la autenticación de móviles de usuarios por medio del Módulo de Identificación del Suscriptor (SIM, *Subscriber Identity Module*) o el Modulo Universal de Identificación del Suscriptor (USIM, *Universal Subscriber Identity Module*).

En pocas palabras, Hotspot 2.0 promete mejorar y en lo posible automatizar procesos que hoy tienen que ser realizados manualmente por el usuario [15].

1.2 REDES HETEROGÉNEAS

Actualmente los operadores de sistemas de comunicación móvil celular, con el propósito de ofrecer servicios de banda ancha sin restricción a todos los usuarios con un nivel de calidad adecuado, despliegan redes homogéneas las cuales son diseñadas e implementadas para brindar servicio con cobertura y capacidad de manera uniforme, utilizando elementos de red con similares características (potencia de transmisión, técnica de acceso, tipo de antena y ganancia, entre otros), sin embargo la arquitectura homogénea cada vez disminuye su cobertura, capacidad y desempeño, debido al rápido crecimiento y concentración de la demanda de servicios de telecomunicaciones, llevando la capacidad de la red al límite, aumentando cada vez más el costo de despliegue y operación sin incrementar considerablemente la efectividad y el desempeño de la red, esto sin contar con el hecho de que cada vez es más difícil adquirir espacios para desplegar macro estaciones base en zonas suburbanas y urbanas metropolitanas.

Por esta razón en los últimos años se han realizado diferentes estudios sobre redes heterogéneas, las cuales buscan ser una solución coherente con el mercado y sus necesidades actuales y futuras por medio de la interacción e integración inteligente de múltiples tipos de nodos, capaces de brindar y mejorar la capacidad y cobertura

inalámbrica en diferentes tipos de escenarios, definiendo una estructura jerárquica de niveles⁴ tal como se muestra en la figura 1.3 [16]; formada por diferentes tipos de celdas, desde el nivel macro en donde se ubican las macro estaciones base hasta niveles inferiores en donde se encuentran las pequeñas celdas compuestas por nodos de baja potencia como: microcelda, picocelda y WiFi, complementando y descargando a la macro estación base en escenarios donde la densidad de población es alta y por consiguiente el tráfico de datos diario es elevado con ciertos requerimientos de desempeño y capacidad, a bajo costo y con baja complejidad.

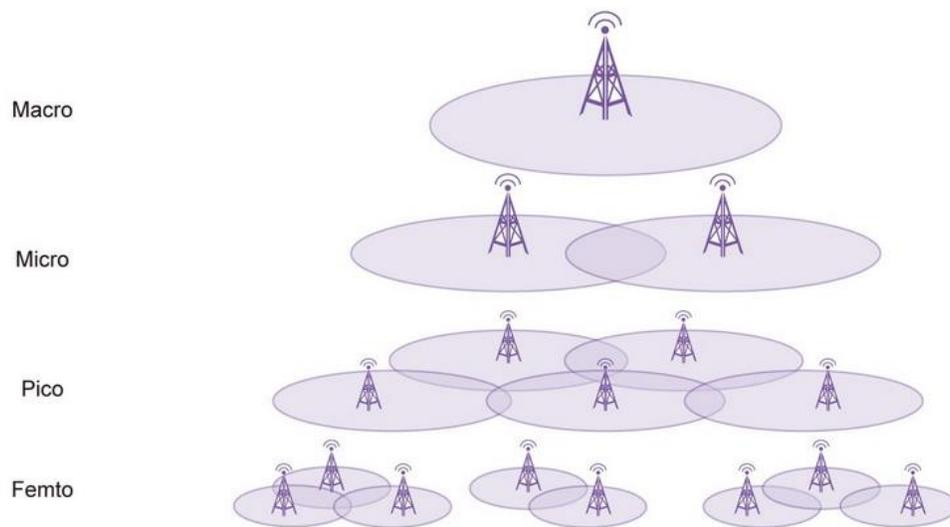


Figura 1.3 Niveles de la arquitectura.

Existen diferentes alternativas de uso de las redes heterogéneas, donde el usuario final puede utilizar los recursos radio ofrecidos por las pequeñas celdas integradas a la red de distintas maneras:

1. Impulsado por el dispositivo: proceso transparente para el usuario final, donde el dispositivo de usuario está configurado para decidir qué red o nodo de servicio brinda las mejores características y condiciones, y de esta forma solicitar automáticamente el acceso a la pequeña celda.

⁴ Niveles, termino referente a la jerarquía entre celdas (macro, micro, pico y femto) desplegadas en un determinado escenario, por ejemplo, en una red puede haber 3 niveles: macro, micro y femto, cada uno independiente.

2. Impulsado por el usuario final: el usuario conscientemente, debido a experiencia y conocimiento previo de la red, decide a qué pequeña celda solicitar acceso y servicio. Debido a que el proceso es manual, puede haber interrupción momentánea del servicio.
3. Impulsado por el operador: por medio de configuración del operador, la red automáticamente habilita y permite al usuario acceder continuamente (en tiempo real) a las pequeñas celdas que estén en acceso abierto, brindando las mejores condiciones y calidad que la red puede ofrecer.

La figura 1.4 [17] presenta la arquitectura de una red heterogénea en una ciudad, en donde se han desplegado diferentes tipos de pequeñas celdas en diferentes escenarios, con el objetivo de aumentar considerablemente el *throughput*⁵ alcanzado por usuario, disminuir considerablemente los errores de transmisión e incrementar la calidad de experiencia de todos los usuarios de la red.

Cabe resaltar que cada nodo de la red heterogénea puede estar soportado al mismo tiempo por múltiples tecnologías de acceso sin problema, como LTE y HSPA.



Figura 1.4 Arquitectura de red heterogénea.

Con esta nueva concepción de red, integrada por varios nodos de servicio ubicados en una misma zona geográfica ya sea rural, suburbana o urbana metropolitana, han surgido diferentes ventajas y soluciones de todo tipo como:

⁵ *Throughput*, velocidad de transmisión de datos hacia o desde algún punto de la red, teniendo en cuenta la información de usuario y la información relacionada a señalización y control que es entregada sin errores, por ello se encuentra en función de la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) o la Tasa de Error de Bloque (BLER, *Block Error Rate*).



- Aumento de la capacidad y calidad de servicio en lugares donde existe gran densidad de usuarios permitiendo el acceso a diferentes servicios.

Considerando la ecuación 1.1, la cual es una adaptación de la ecuación de capacidad de Shannon [18], en la que se consideran múltiples antenas y celdas:

$$\text{Capacidad} = N * K * W * \log_2 (1 + SINR), \quad (1.1)$$

donde,

Capacidad, es la velocidad máxima de transmisión de datos que puede ser alcanzada, dadas las condiciones de un determinado canal o sistema, en bits por segundo.

N, número de antenas por estación base (4-8), cuando se hace uso de sistemas de múltiples antenas.

K, número de pequeñas celdas.

W, ancho de banda.

SINR, relación señal a interferencia más ruido.

Asumiendo que la red constituida por solo una macro estación base tiene una ganancia de capacidad de 1x, en la figura 1.5 [18] se aprecia que a medida que se adicionan a la red diferentes tipos de pequeñas celdas se aumenta la ganancia de capacidad, comenzando con un aumento de más de 5.7 veces adicionando cuatro pequeñas celdas en la red, 11.4 veces adicionando ocho pequeñas celdas a la red, 21 veces adicionando 16 pequeñas celdas y un aumento de 37 veces la capacidad de la red adicionando treinta y dos pequeñas celdas. En síntesis, la capacidad de la red se puede incrementar proporcionalmente al número de pequeñas celdas adicionadas a la red.

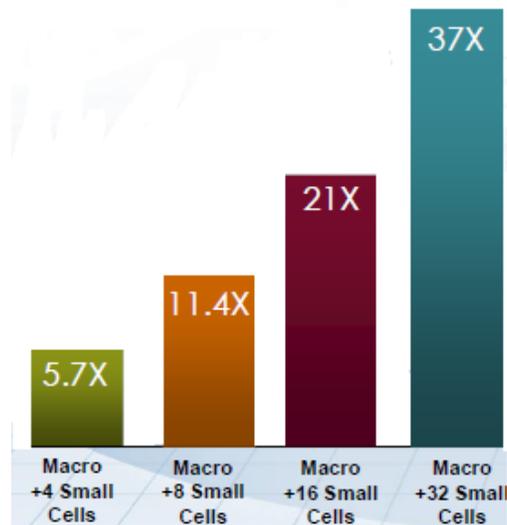


Figura 1.5 Ganancia en la capacidad de la red [bps].

- Aumento de la cobertura y movilidad en la red, acercando tanto como sea posible los nodos de servicio a los usuarios, abarcando áreas donde las macro estaciones base no logran ofrecer cobertura.

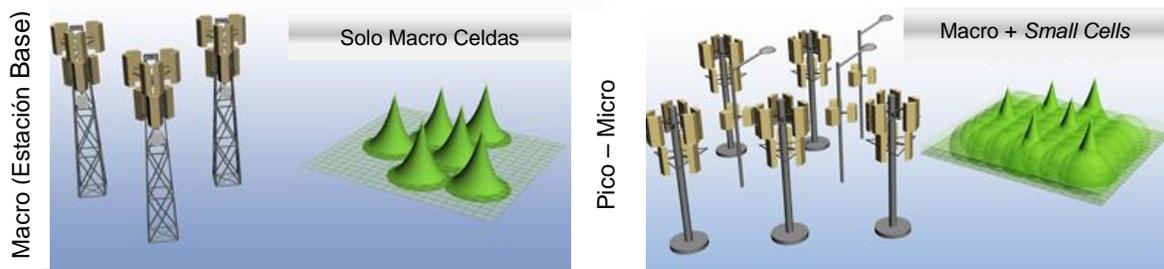


Figura 1.6 Cobertura de red con y sin pequeñas celdas.

En la figura 1.6 [19] se aprecia como el despliegue de pequeñas celdas en una región gobernada por solo macroceldas permite ampliar la cobertura de la red, permitiendo brindar servicio en cualquier lugar y momento, disminuyendo cada vez más el número de macroceldas que se implementan anualmente, donde según el último informe del año 2012 sobre la situación de mercado de pequeñas celdas, el número total de femto estaciones base ha superado el número total de macro estaciones base móviles tradicionales y se incrementa anualmente de manera



exponencial como se aprecia en la figura 1.7 [22]. El informe muestra que entre octubre y noviembre de 2012, el número de pequeñas celdas ha superado los 6'000,000 (6'069,224) a diferencia de las 5'925,974 macroceldas desplegadas en todo el mundo. Cabe resaltar que la mayor parte de las pequeñas celdas desplegadas (más del 80%) corresponden a femtoceldas residenciales [20] [21].

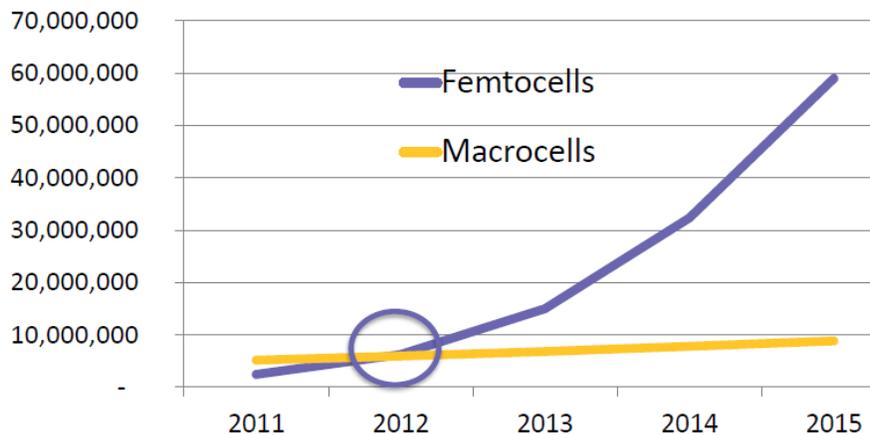


Figura 1.7 Despliegue de femtoceldas vs macroceldas.

- Reducción considerable de los costos de operación⁶, mantenimiento e inversión.

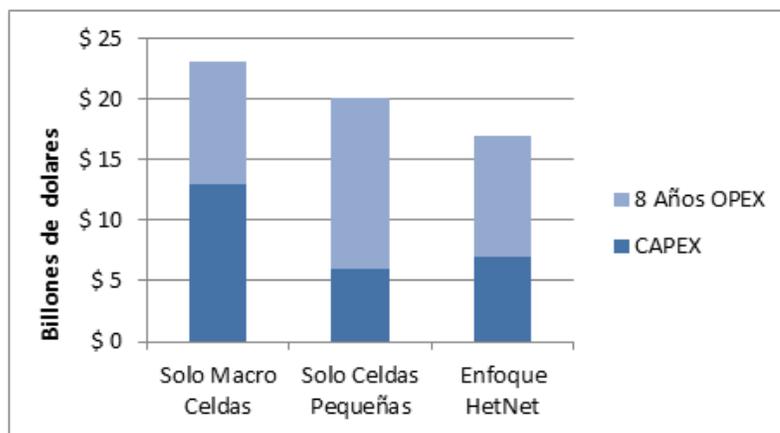


Figura 1.8 Costo de inversión, operación y mantenimiento de diferentes arquitecturas.

⁶ Billones generalmente en la literatura inglesa se entienden como miles de millones.



En la figura 1.8 [23] se aprecia cómo la proliferación de las pequeñas celdas y redes heterogéneas disminuye considerablemente los costos de operación, mantenimiento e inversión.

- Mejor gestión de los recursos radio de la red, ya que cuenta con el soporte de redes auto organizadas (SON): extensión de cobertura (*Range Extension*) y Coordinación de Interferencia con Cancelación de Interferencia (ICIC/IC, *Interference Co-channel Coordination / Interference Cancellation*).
- Disminución considerable de la carga de usuarios en las macroceldas, liberando espectro, reduciendo el nivel de potencia de transmisión requerido y permitiendo a la macro estación base brindar un mejor servicio a los usuarios que atiende.

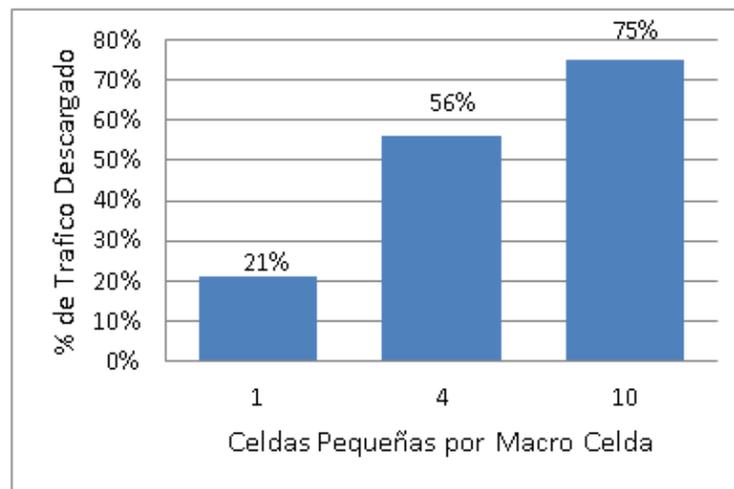


Figura 1.9 Trafico descargado haciendo uso de HetNets.

En la figura 1.9 [24] se aprecia como la adición de pequeñas celdas permite la descarga de tráfico en la macrocelda en 21 % implementando una pequeña celda, de la misma forma 56 % integrando cuatro pequeñas celdas y finalmente 75 % con diez pequeñas celdas, permitiendo a la macrocelda brindar mejor servicio.

- Las redes heterogéneas tienen la posibilidad de operar en diferentes bandas de frecuencia, abarcando diferentes tecnologías. La figura 1.10 [25] presenta las diferentes bandas de frecuencia donde las pequeñas celdas pueden operar y una proyección al 2016.

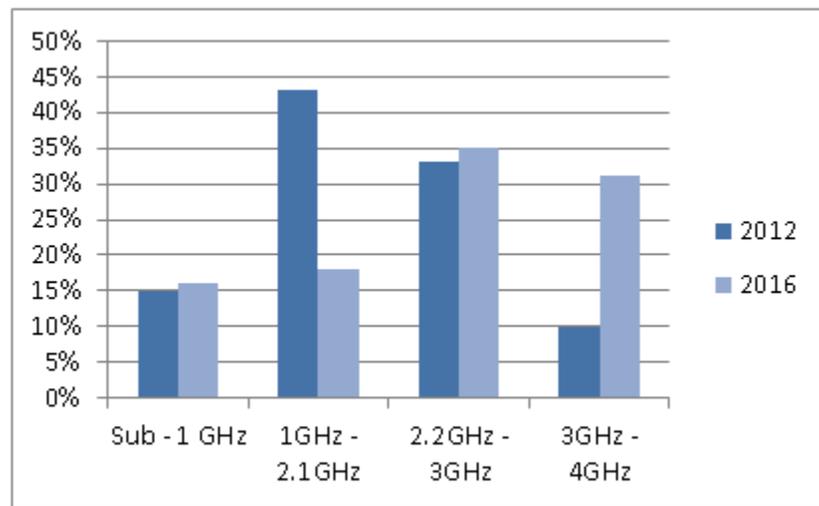


Figura 1.10 Porcentaje de pequeñas celdas desplegadas en diferentes bandas.

1.2.1 Características de Operación

1.2.1.1 Espectro

El espectro como recurso más importante de las redes debe ser gestionado de la mejor forma posible y aún más en el diseño e implementación de una red heterogénea donde diferentes estaciones base simultáneamente lo utilizan, por lo tanto a continuación se describen los diferentes casos de gestión del espectro:

1.2.1.1.1 Espectro dedicado

En este caso se asigna una porción distinta del espectro disponible a cada celda o nivel, es decir, para el nivel macro en donde se encuentra la macro estación base se asigna una banda de frecuencia única para brindar servicio a los usuarios, mientras que, para las picoceldas, microceldas y femtoceldas se asignan diferentes bandas de frecuencias, evitando totalmente la posible interferencia entre niveles o Interferencia Cruzada (CTI, *Cross Tier Interference*), no obstante, la interferencia en el mismo nivel o Interferencia Co-Nivel (CoTI, *Co-Tier Interference*) seguirá existiendo entre pequeñas celdas, degradando el servicio.



1.2.1.1.2 Espectro compartido

En este caso se asigna todo el espectro disponible a todos los niveles de la arquitectura de red, haciendo uso del mismo espectro tanto en el nivel macro donde están las macro estaciones base, como los niveles inferiores donde se ubican las pequeñas celdas, resultando un escenario en donde los dispositivos ubicados en todos los niveles interferirán a los demás dispositivos que se encuentren tanto en su mismo nivel (interferencia co-nivel) como en diferentes niveles (interferencia cruzada), obligando a establecer mecanismos que ayuden a mitigar apropiadamente la interferencia.

1.2.1.1.3 Espectro parcialmente compartido

En este caso el nivel macro tiene acceso a todo el espectro disponible, mientras que los demás niveles solo podrán acceder a una parte previamente definida, esto con el fin de obtener una mejor eficiencia espectral que en el caso de espectro dedicado, y disminuir la interferencia en el mismo nivel (interferencia co-nivel) presente en un escenario con espectro compartido.

1.2.1.2 Extensión de cobertura

Un aspecto importante en el diseño e integración de pequeñas celdas en arquitecturas heterogéneas, es el conflicto entre las señales dirigidas hacia los usuarios provenientes tanto de las macro estaciones base como de las pequeñas celdas, donde el terminal de usuario tendrá que definir eventualmente qué nodo de red presenta mejores condiciones para su conexión y recepción de información. Este conflicto se origina debido a que la potencia de transmisión de la macro estación base supera ampliamente la potencia de transmisión utilizada por cualquier pequeña celda, y en consecuencia es posible que ofrezca a los usuarios una mejor Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR, *Signal to Interference plus Noise Ratio*) y en efecto mayor capacidad como se indica en la ecuación 1.1. De esta forma se generan dos casos: el primer caso de estudio es en el Enlace de Bajada (DL, *Down-link*), donde sin importar que tan cercana se encuentre una pequeña celda al terminal de usuario, éste percibirá con mayor potencia la señal transmitida por la macro estación base, conectándose a la macro estación base, obviando las pequeñas celdas ; y por otro lado el segundo caso de estudio es en el Enlace de Subida (UL, *Up-Link*), donde a diferencia del anterior caso, la potencia está dada por el terminal de usuario y probablemente la señal del usuario la percibirá con mayor intensidad



cualquier pequeña celda que esté más cerca que la macro estación base con respecto al terminal de usuario, ya que las condiciones de propagación de la señal hasta la pequeña celda serán mejores que las condiciones de propagación hasta la macro estación base, conectándose a la pequeña celda. En conclusión, debido al despliegue de varias y distintas celdas, el terminal de usuario tendrá problemas en el momento de elegir a qué estación base conectarse.

Sin embargo, debido a que el enlace de bajada, en muchos casos, contiene la información más relevante para el usuario, el terminal de usuario muy seguramente se conectará siempre a la macro estación base de la cual percibe la señal con mayor potencia. Luego, todos los terminales de usuarios que estén ubicados en la misma área, se conectarán a la misma macro estación base, saturándola y obligando eventualmente la desconexión temporal de algunos usuarios. Lo anterior hace necesaria la introducción de expansión de cobertura, técnica que le permite a las diferentes pequeñas celdas y terminales de usuario dejar a un lado el hecho de que la señal transmitida por la macro estación base tenga mayor potencia y Relación Señal a Interferencia (SIR, *Signal to Interference Ratio*), logrando que varios usuarios ubicados dentro del área de cobertura de la macro estación base se conecten a cualquier pequeña celda cercana, disminuyendo la carga de usuarios y tráfico de datos por macro celda (balanceo de carga), mejorando considerablemente la calidad y capacidad de la red.

La técnica de extensión de cobertura como se muestra en la figura 1.11 [26], tiene diferentes estrategias; una de ellas es cambiar el algoritmo que conlleva al terminal de usuario elegir conectarse a la macro estación base, basado en la intensidad de potencia de la señal recibida, por las pérdidas mínimas de propagación desde el nodo de servicio hasta el terminal de usuario. De ésta forma, debido a que siempre las pequeñas celdas se encontrarán más cerca al usuario que cualquier macro estación base, las pérdidas de propagación de la señal desde una pequeña celda hasta el terminal de usuario serán menores y en consecuencia las micro, pico y femtoceldas aumentarán la probabilidad de atender a más usuarios, descargando la macro estación y mejorando integralmente la capacidad de la red y la experiencia de usuario.

Otra estrategia utilizada para extensión de cobertura es disminuir la potencia de transmisión de determinadas portadoras utilizadas por la macro estación base, permitiendo a las pequeñas celdas hacer uso de ellas y competir a nivel de potencia recibida con la macro estación base, balanceando el número de usuarios por nodo de servicio [26].

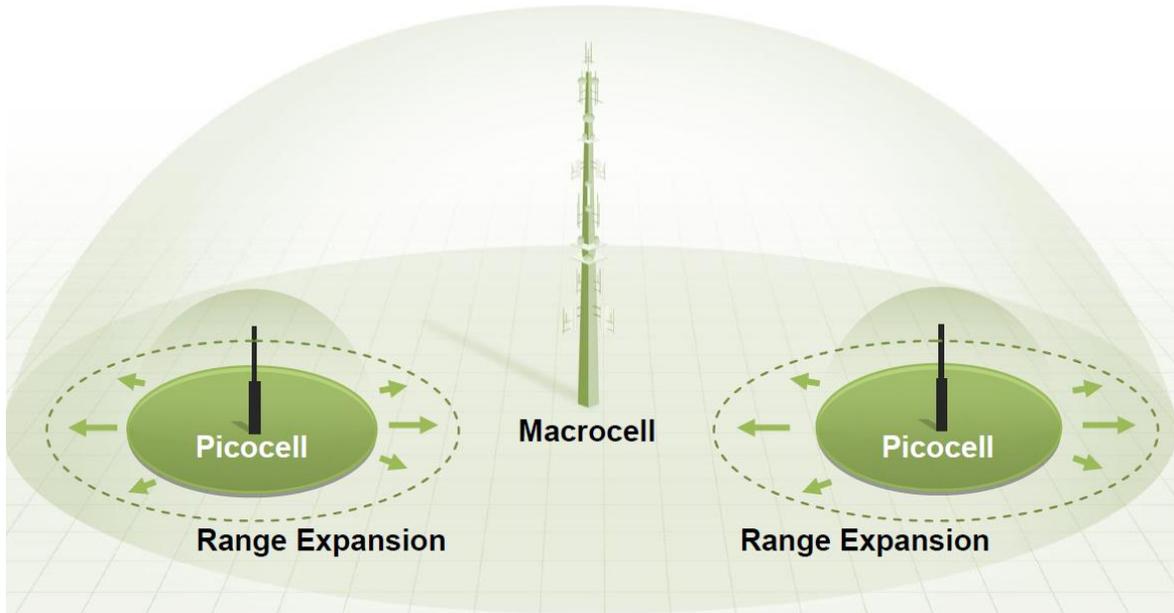


Figura 1.11 Expansión de cobertura de una pico celda.

1.2.1.3 Topología de red adaptativa y descubrimiento de pequeñas celdas

Teniendo en cuenta que las pequeñas celdas tienen cobertura limitada, ya que son nodos de servicio de baja potencia, los diferentes operadores y usuarios tendrán que desplegar gran cantidad de éstas para hacer frente a la demanda de tráfico y movilidad de los usuarios, aumentando la cantidad de interferencia presente en el sistema. Gracias a la topología de red adaptativa y al descubrimiento de pequeñas celdas, en vez de permanecer activos todo el tiempo cada una de las pequeñas celdas, de acuerdo a indicadores de red como peticiones de acceso de usuarios o tráfico, solo algunos nodos se activarán satisfaciendo la totalidad de la demanda de tráfico por parte de los usuarios, disminuyendo la interferencia en el sistema y el costo de operación.

1.2.1.4 Gestión avanzada de interferencia

En el proceso de migración de redes con celdas macro a redes heterogéneas, el hecho de incrementar nodos o estaciones base en la arquitectura de red, hace que la interferencia se convierta en la más importante limitante de desempeño y calidad, la cual aumenta progresivamente a medida que se aumenta el número de componentes o nodos



presentes en la red, por esta razón si se logra controlar la interferencia de alguna manera, no habrían obstáculos para incrementar la capacidad de la red.

El objetivo del presente trabajo de grado consiste en analizar el comportamiento de la interferencia co-canal asociada al número de nodos de red y el efecto de diferentes mecanismos de control de interferencia co-canal.

1.2.1.5 Coordinación de interferencia inter-celda

A diferencia de una arquitectura de red homogénea, en donde la Interferencia Inter-Celda (ICI, *Inter-Cell Interference*), se puede manejar fácilmente, ya que solo la macro estación base se encarga de todas las transmisiones hacia los usuarios, ya sea información o control, en una arquitectura de red heterogénea se integran y despliegan distintas pequeñas celdas, las cuales al igual que la macro estación base continuamente están enviando y recibiendo información de usuario, incrementando considerablemente la interferencia en el sistema, provocando la degradación del servicio y en el peor de los casos la desconexión, dependiendo de cómo se estén utilizando los recursos radio relacionados con potencia y ancho de banda.

En este sentido, es importante gestionar los recursos radio de la red entre macroceldas y pequeñas celdas, haciendo uso de mecanismos de Coordinación de Interferencia Inter-Celda (ICIC, *Inter-Cell Interference Coordination*) [27], tanto en el dominio de la potencia, donde la pequeña celda constantemente censa el nivel de interferencia presente en el sistema y dependiendo de ésta modifica su nivel de potencia de trasmisión, disminuyendo la interferencia co-canal hacia los usuarios de la macro estación base, sin afectar la calidad de servicio a los usuarios de pequeñas celdas, como en el dominio de la frecuencia, donde la macro estación base reserva diferentes bandas de frecuencias para que exclusivamente las pequeñas celdas puedan hacer uso de éstas, esto con el objetivo de disminuir tanto como sea posible la interferencia, aumentando la relación señal a interferencia (SIR), y aprovechando al máximo los recursos radio de la red.

Existen dos tipos de escenarios donde se presenta interferencia inter celda (ICI) en una arquitectura heterogénea.

1. Interferencia entre niveles (*CTI*): este caso particular de interferencia ocurre entre nodos de servicio de la red correspondientes a diferentes niveles, por ejemplo, un elemento ubicado en los niveles micro, pico o femto celular interfiere a un elemento ubicado en el nivel macro, y viceversa.



2. Interferencia en el mismo nivel (*CoTI*): este caso de interferencia ocurre cuando nodos de servicio de la red del mismo nivel se interfieren entre sí, por ejemplo cuando una femtocelda interfiere a un femto-usuario (FU) de una femtocelda vecina.

1.2.1.5.1 Gestión adaptativa de interferencia

El objetivo de esta técnica es delegar a una entidad central, como por ejemplo en redes auto organizadas (SON), el Sistema de Gestión de Elementos (EMS, *Element Management System*) y Configuración Dinámica Radio (RDC, *Dynamic Radio Configuration*), la tarea de recolectar en tiempo real la mayor cantidad de información relacionada con los recursos radio disponibles en la red, para luego definir una adecuada combinación de potencias de transmisión de todos los elementos presentes en cada nivel de la red y terminales de usuario, y de esta manera asignar de forma equitativa los recursos radio de ancho de banda entre los diferentes elementos de la red, todo esto en periodos de tiempo definidos.

1.2.1.6 Red de transporte

Teniendo en cuenta que uno de los objetivos de integrar pequeñas celdas a la arquitectura de red es incrementar la cantidad de usuarios atendidos con las mejores características y condiciones, las pequeñas celdas necesitan de un medio físico por el cual transmitir toda la información de usuario hacia el núcleo u otro elemento de la red.

Existen dos principales soluciones:

1. Soporte macro: donde cada pequeña celda se conecta por medio físico a la estación macro más cercana y así se comunica con el núcleo u otro elemento de red.
2. Terceros: donde el operador debe arrendar infraestructura de red a terceros para enviar la información de usuario de las pequeñas celdas hacia el núcleo u otro elemento de red del operador.



1.3 FACTORES QUE IMPULSAN LAS REDES HETEROGÉNEAS

Actualmente el mundo de la comunicación inalámbrica y en particular las redes móviles celulares ofrecen diversos beneficios que los sistemas de comunicaciones alambradas no ofrecen, por esta razón, actualmente crece considerablemente el número de subscriptores en el mundo, esperando que las diferentes tecnologías, arquitecturas y protocolos proporcionen mayores y mejores beneficios. Para lograrlo se deben tener en cuenta tres variables importantes que deben ir paralelamente evolucionando y mejorando, los cuales son: calidad, capacidad y cobertura. A continuación se hace un análisis de mercado actual y una proyección de lo que será en unos años.

1.3.1 Calidad

Partiendo de la premisa de que el factor más importante para que un bien o servicio prospere en la industria de las telecomunicaciones móviles es la experiencia de usuario, los operadores a nivel mundial están siendo obligados, a causa del inmenso crecimiento de usuarios, a desplegar y densificar macro estaciones base en todas las ciudades. Las cuales son muy costosas y en pocos años serán incapaces de corresponder a las expectativas del usuario, quien cada día espera y demanda un mejor servicio representado en conectividad en cualquier lugar y en cualquier momento, mayores velocidades de transmisión de datos, bajo costo, baja latencia, baja probabilidad de bloqueo y más servicios; todo esto motiva y obliga el desarrollo e implementación de soluciones coherentes como lo son las redes heterogéneas.

La figura 1.12 [28], predice que el 60 % del tráfico en 2016 se generará en áreas urbanas y metropolitanas, influyendo directamente en la implementación progresiva de redes heterogéneas a fin de que las redes móviles celulares futuras sean capaces de ofrecer servicio de calidad en áreas densas de población y alto volumen de tráfico.

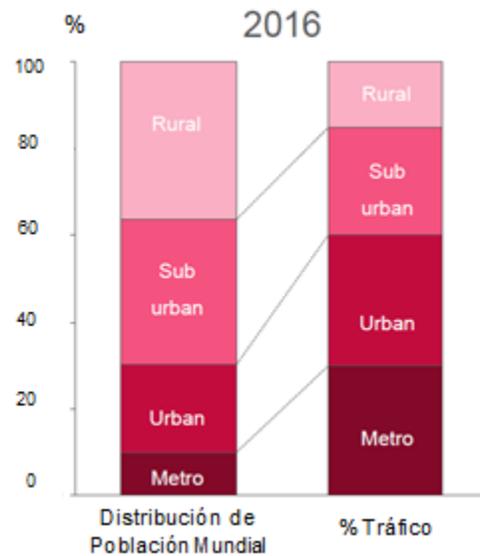


Figura 1.12 Distribución de población y tráfico mundial para el año 2016.

1.3.2 Capacidad

- Tráfico de datos demandados.

La figura 1.13 [29] presenta la cantidad de tráfico de voz y datos entre los años 2007 y 2012, en la cual se aprecia un crecimiento exponencial de tráfico de datos por usuario, especialmente entre el 2011 y 2012, donde en el segundo cuarto del año 2012 presentó un consumo de datos de casi 800 Petabytes por mes (800,000,000,000,000,000 bytes/mes) y aproximadamente 180 Petabytes por mes (180,000,000,000,000,000 bytes/mes) de voz, exigiendo el despliegue inmediato de nuevas tecnologías y arquitecturas de red.

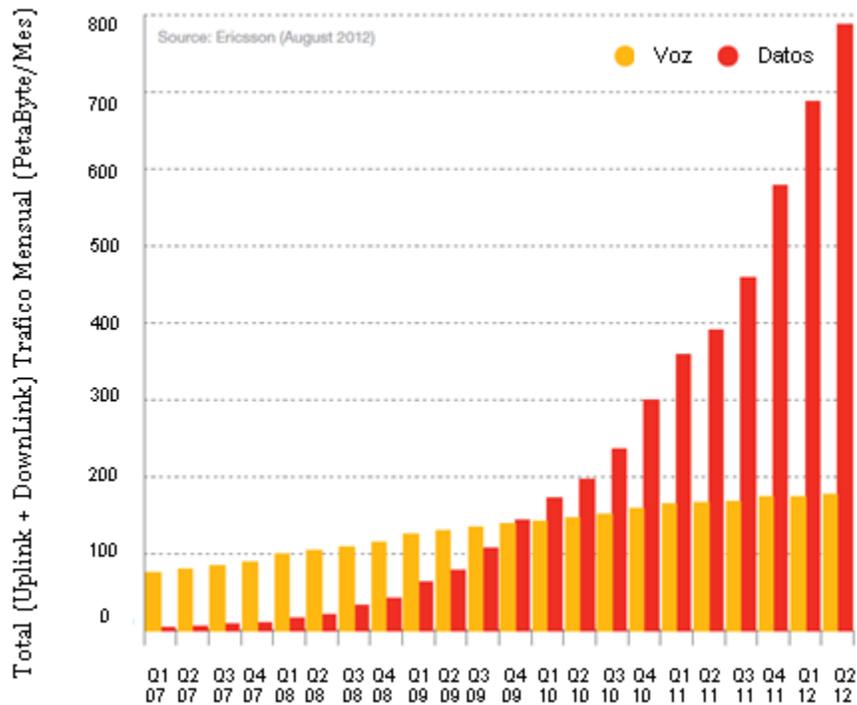


Figura 1.13 Trafico mundial total en redes móviles entre 2007 y 2012.

- Suscriptores.

La figura 1.14 [30], presenta el porcentaje de suscriptores de comunicación móvil celular en el mundo, en la cual se aprecia que actualmente en el mundo existen 63,000 millones de suscripciones, los cuales han aumentado en 11% en el último año, además, se desplegaron alrededor de 140 millones de nuevas redes con aproximadamente 80 millones de nuevos suscriptores. De la misma forma aproximadamente el 40% de todos los teléfonos móviles vendidos en el segundo cuarto del 2012 fueron teléfonos inteligentes, en comparación con el 30% en el año 2011. Cabe resaltar que solo el 15% de suscriptores en el mundo hace uso de servicios con teléfonos inteligentes, lo cual significa que cada vez será mayor la demanda de servicios y con ello el tráfico de datos [30].

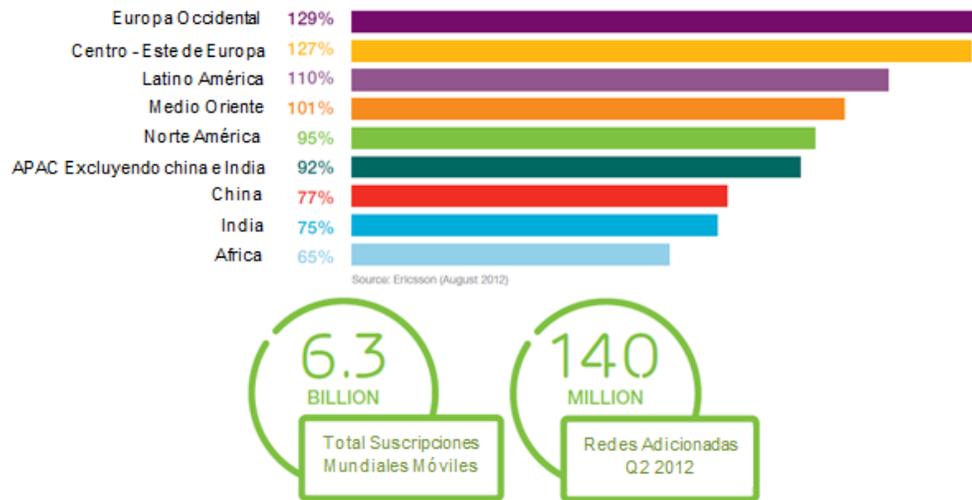


Figura 1.14 Porcentaje de usuarios de comunicación móvil celular.

1.3.3 Cobertura y Costos

- Cobertura

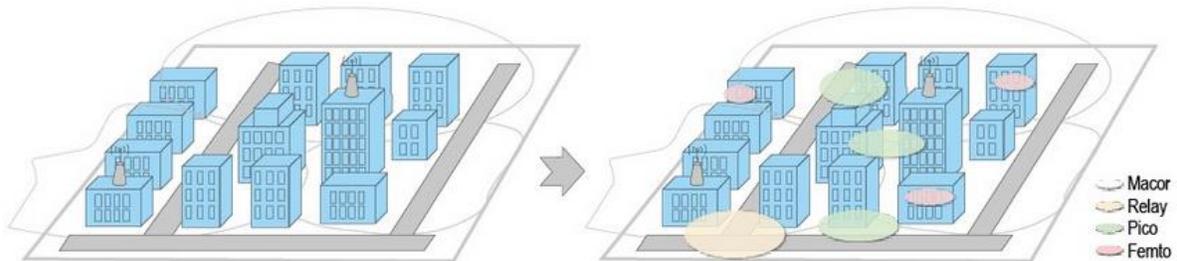


Figura 1.15 incremento de cobertura debido a la evolución de redes homogéneas a redes heterogéneas.

La figura 1.15 [31], representa cómo la cobertura de las redes homogéneas actuales cumplen con el objetivo de satisfacer los servicios demandados a nivel general utilizando solo macro estaciones base; a diferencia de las redes heterogéneas que logran expandir e incrementar por medio de micro, pico y femto estaciones base la cobertura de la red en general, contando con señal en puntos donde la señal de las macro estaciones base no llega.



- Costos

La figura 1.16 [32], presenta el costo aproximado en porcentaje de despliegue e instalación tanto de macro estaciones base como de pequeñas celdas, donde la diferencia entre la macro estación base y la pico estación base es de más del 80 %, repercutiendo directamente en el costo por bit y en consecuencia en el precio que el usuario deberá pagar por el servicio.

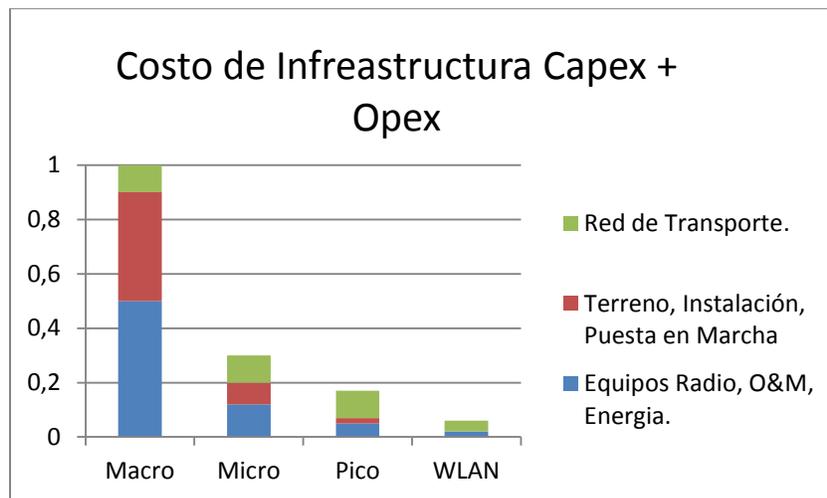


Figura 1.16 Estimación de costos de despliegue y puesta en marcha de estaciones base macro y pequeñas celdas.

1.3.4 Redes Verdes

La figura 1.17 [34] presenta la incidencia negativa en el medio ambiente por la operación de una macro estación base y dispositivos utilizados por el usuario final, lo cual motiva la investigación de estrategias de reducción y/o compensación de emisiones de CO₂ y desarrollo de nuevas tecnologías y arquitecturas de red más eficientes energéticamente que logren disminuir cada vez más la huella de carbono, la energía cautiva y la energía utilizada por bit [33].

Emisión anual de CO₂ por SuscriptorFigura 1.17 Emisión de CO₂ en el año.

1.4 REDES AUTO ORGANIZADAS

Partiendo de premisas como, ofrecer mayor capacidad, operatividad y optimizar el comportamiento de la red sin sacrificar la experiencia de los usuarios finales, para que una red heterogénea con múltiples pequeñas celdas desplegadas soportadas por múltiples tecnologías sea exitosa, es de gran importancia involucrar procesos de redes auto organizadas (SON), que permitan planear, configurar, mejorar y gestionar apropiadamente la integración de nuevos elementos, interferencia, porcentaje de carga por celda y movilidad, además de múltiples factores de igual importancia con la mínima intervención humana, ya que manejar manualmente cada una de las pequeñas celdas sería prácticamente imposible, y peor aún en el caso de estaciones base para hogar donde el usuario final las está moviendo constantemente entre su hogar, oficina u otros sitios; y si se logra demandaría un trabajo muy arduo, mucho tiempo, dinero y no se haría de la mejor manera.

Un elemento fundamental en el proceso de redes auto organizadas (SON) es la configuración dinámica radio (RDC), la cual permite que cualquier elemento nuevo en la red como se muestra en la figura 1.18 [35], se adapte al contexto de la arquitectura de red actual, configurando automáticamente la nueva estación base y a sus vecinos, de tal forma que los parámetros de radio más importantes de configuración sean ajustados y proporcionados automáticamente al poner en servicio el nuevo elemento, proceso

fundamental en una red heterogénea constituida por múltiples y diferentes estaciones bases.

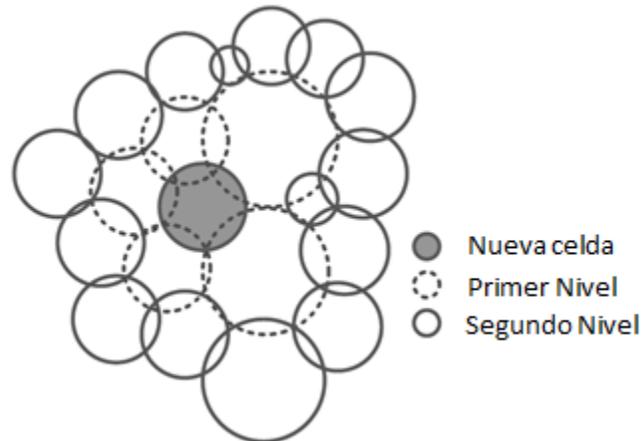


Figura 1.18 Integración de nuevo elemento de red.

De esta manera, se presentan algunos procesos que permiten optimizar el desempeño de una red heterogénea desplegada.

1.4.1 Auto Configuración

Este proceso tiene como finalidad integrar y poner en servicio cualquier nuevo elemento de red que el operador esté dispuesto a desplegar sin la intervención humana, para esto se lleva a cabo tres fases como se presenta en la figura 1.19: auto configuración de conectividad, donde se establece conexión segura entre la nueva estación base, el núcleo de red, el dominio de gestión y administración del sistema; auto puesta en marcha, donde se realizan pruebas de funcionamiento y se proporciona toda la información de elementos de red tanto de software como de hardware, y configuración dinámica radio, donde se complementa la información recolectada en la fase de puesta en marcha y se permite la actualización permanente de información de parámetros radio.



Figura 1.19 Fases de auto configuración.

1.4.2 Auto Optimización

El proceso de auto optimización se realiza a continuación del proceso de auto configuración, administrando la red de manera automática haciendo uso de mediciones, siendo de vital importancia en una arquitectura de red cambiante como lo es una red heterogénea, ya que por ejemplo puede ocurrir:

- Cambios en las condiciones de propagación, por ejemplo, nuevos edificios o calles, lluvias, cambio de clima, entre otros.
- El comportamiento del tráfico, por ejemplo, nuevas concentraciones de usuarios en determinadas áreas, como trenes, oficinas, estadios entre otros.
- Despliegue, por ejemplo, la inserción de nuevas estaciones base.

Además de obtener información en tiempo real permite analizar y tomar decisiones mucho más realistas y certeras con la finalidad de optimizar el desempeño de la red, que con la información previa o teórica obtenida en el proceso de auto configuración y despliegue de cualquier elemento de red.



1.4.3 Auto Reparación y Mantenimiento

Las redes de telecomunicaciones móviles han evolucionado formidablemente desde que iniciaron hasta nuestros días, convirtiéndose en un sistema cada vez más complejo, difícil de organizar y más propenso a errores de operación, por esta razón las redes auto organizadas (SON), con el propósito de mantener y mejorar el desempeño de una red cada vez más compleja, han definido un procedimiento denominado auto reparación o sanación, el cual diagnostica los problemas emergentes de una red determinada y establece una serie de mecanismos y procedimientos posteriores que brinden solución a dicho problema.

De manera general el proceso de auto reparación sigue los siguientes pasos:

1. Monitoreo continuo del estado de las condiciones predeterminadas de operación en el elemento de red. En el caso de que se encuentre alguna anomalía se dispara el proceso de auto reparación.
2. Dependiendo de la anomalía presente en la red, se solicita toda la información relevante relacionada como: indicadores de desempeño, mediciones radio, variables del sistema, resultados de pruebas, etc.
3. Con base en la información de la anomalía y la información adicional solicitada, se determinan las posibles causas de la falla junto con el posible diagnóstico.
4. Después de conocer la falla y las posibles soluciones, se aplican los determinados correctivos manuales o automáticos, dependiendo de la clase de falla y se pone de nuevo en servicio.
5. Se realiza un seguimiento de la falla, con el propósito de garantizar la reparación y el buen funcionamiento de la red.
6. Si persiste o se genera un nuevo problema se realiza una nueva iteración, hasta reparar completamente la falla.

Como medida adicional, diferentes operadores optan por realizar seguimiento continuo a sus redes, por medio de sistemas de gestión que soportan múltiples funciones y tecnologías, los cuales realizan diferentes pruebas y mediciones a los diferentes elementos de la red, para así controlar y en lo posible prevenir cualquier falla en el sistema [36].



1.5 RADIO COGNITIVA

En la actualidad, debido a la creciente demanda y asignación de espectro por parte de los organismos pertinentes a los diferentes operadores, cada vez es más escaso el espectro por debajo de los 3 GHz, el cual permite la transmisión de señales con las mejores características de propagación, por esta razón, recientemente se han estudiado diferentes maneras de hacer un uso más eficiente del espectro disponible o no utilizado y así incrementar los beneficios que el espectro puede brindar. De esta forma, gracias a diferentes investigaciones, surge la Radio Cognitivo (CR, *Cognitive Radio*), la cual permite que un sistema de radiofrecuencia sea capaz de variar sus parámetros de transmisión basándose en su interacción con el entorno en el que opera.

Un dispositivo dotado con radio cognitivo presenta dos características principales:

- Capacidad cognitiva: tecnología que permite monitorear en tiempo real la información de radiofrecuencia en el sistema e identificar las diferentes bandas de frecuencia que no están siendo utilizadas, y así hacer un buen uso de ésta, sin interferir a los demás usuarios.
- Auto reconfiguración: tecnología que permite variar de manera dinámica diferentes parámetros de transmisión o recepción, como lo son la potencia de transmisión, esquema de modulación, frecuencia de operación, entre otros [37].

Para que un sistema de radio cognitivo funcione debidamente y de acuerdo con la calidad establecida, se deben tener en cuenta cuatro aspectos:

1.5.1 Detección de Bandas de Frecuencia que no Están Siendo Utilizadas

Proceso en el cual se captura toda la información posible acerca del espectro utilizado y las bandas disponibles haciendo uso de técnicas como: detección de transmisiones, detección cooperativa⁷ y detección basada en interferencias.

1.5.2 Administración de Bandas de Frecuencia

Proceso posterior a la detección de bandas disponibles, el cual permite tomar decisiones sobre las bandas que no están siendo utilizadas por usuarios primarios⁸, basándose en

⁷ Detección cooperativa, proceso donde usuarios de radio cognitivo intercambian periódicamente información sobre detección de usuarios principales y bandas que estén utilizando.

⁸ Usuarios primarios, usuarios licenciados abonados a un determinado operador.



los requerimientos de los usuarios secundarios⁹ y ciertas políticas establecidas previamente, de esta forma para lograr el mejor desempeño, primero se identifican las características de las bandas de frecuencias disponibles, para que inmediatamente, dependiendo de los requerimientos de cada usuario secundario y características del canal, se le asigne a cada usuario secundario la banda que mejor se ajuste.

1.5.3 Movilidad Espectral

Proceso en el cual tanto el trasmisor como el receptor son capaces de cambiar de frecuencia de operación, ya sea para cambiar a otra frecuencia con mejores características, o porque usuarios primarios con mayor prioridad deben utilizar dichas frecuencias.

1.5.4 Distribución de Bandas de Frecuencia

Proceso que tiene como objetivo la distribución equitativa y de igual prioridad del espectro entre todos los usuarios de un sistema de radio cognitiva [38].

⁹ Usuarios secundarios, usuarios no licenciados que solicitan recursos radio para su servicio.



2. DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y PLAN DE PRUEBAS DE LA SIMULACIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo expone y lleva a cabo la metodología de trabajo usada para planificar, estructurar y controlar el proceso de modelado de una simulación estática a nivel de sistema, la cual permitirá en primer lugar evaluar y analizar en el enlace de bajada y la interferencia co-canal (CCI) presente en una arquitectura de red heterogénea (HetNet) de dos niveles, donde interactúan usuarios de la red móvil: femtoceldas y una macro estación base.

En segundo lugar, con el fin de analizar el desempeño de la red, se evaluarán diferentes mecanismos de coordinación de interferencia y procedimientos generales que buscan reducir la interferencia co-canal (CCI) generada entre los dos niveles de la red heterogénea (HetNet), haciendo uso de algoritmos generales de Gestión de Recursos Radio (RRM, *Radio Resource Management*).

Finalmente, se evaluará la calidad a partir de la probabilidad de degradación del servicio, la cantidad de interferencia en el sistema y la relación señal a interferencia (SIR) con y sin mecanismos de coordinación de interferencia.

2.2 METODOLOGÍA DE DESARROLLO

Para lograr los objetivos propuestos, el modelo seleccionado para el desarrollo de la simulación fue el modelo lineal secuencial [39], el cual sugiere una sucesión de fases ordenadas y un encadenamiento entre ellas, facilitando la gestión de desarrollo, diseño, implementación y solución al problema planteado. La figura 2.1 permite observar la estructura del modelo.



Figura 2.1 Modelo lineal secuencial.

Cada una de las fases se desarrolla de la siguiente manera:

- **Análisis de requerimientos:** esta fase se enfoca en recolectar toda la información relacionada con la simulación, posteriormente analizarla y finalmente evaluar el problema, plantear soluciones, estudiar la viabilidad y determinar los límites.
- **Diseño:** esta fase se enfoca en el modelado de la simulación.
- **Implementación:** esta fase se enfoca en la elaboración de la simulación, siguiendo lo estipulado en la fase de diseño.
- **Pruebas:** en esta fase se procede a realizar las pruebas pertinentes para validar y analizar resultados.

2.2.1 Análisis de Requerimientos

2.2.1.1 Problema de estudio

Las redes heterogéneas (HetNet) progresivamente están siendo desplegadas alrededor del mundo, como solución a la creciente demanda de servicios de alta calidad, cobertura y capacidad; sin embargo, se espera que en un futuro no lejano, debido a la integración e interacción de muchas femtoceldas con picoceldas, microceldas y macroceldas dentro de



un mismo escenario, las redes HetNet presentarán ciertos desafíos, probablemente uno de los más importantes es la interferencia co-canal (CCI), la cual afecta de manera dinámica la calidad, cobertura y capacidad de la red. Por esta razón es necesario analizar mecanismos de gestión de interferencia que permitan controlar la interferencia co-canal (CCI) en los sistemas existentes y futuros.

2.2.1.2 Requerimientos

Después de comprender de forma clara el problema se procede a definir los requerimientos de contenido, forma y funcionalidad de la simulación, los cuales permitirán satisfacer y cumplir los objetivos acordados en el presente trabajo de grado.

De esta forma, como resultado del proceso de definición de requerimientos de simulación, se elaboró la siguiente lista:

Requerimiento 1: seleccionar la herramienta software más conveniente para realizar los procedimientos definidos.

Requerimiento 2: definir las características y elementos del escenario de simulación.

Requerimiento 3: especificar el modelo de propagación.

Requerimiento 4: seleccionar procedimientos o mecanismos generales de control de interferencia co-canal (CCI) basados en frecuencia y potencia acordes al estudio a realizar.

Requerimiento 5: evaluar el desempeño del sistema, en términos de interferencia, relación señal a interferencia (SIR) y calidad.

Requerimiento 6: aplicar y evaluar procedimientos o mecanismos generales de control de interferencia, con el fin de reducir la interferencia co-canal (CCI).

Requerimiento 7: realizar análisis estadísticos haciendo uso de la Función de Densidad de Probabilidad (PDF, *Probability Density Function*), Función de Distribución Acumulativa (CDF, *Cumulative Distribution Function*) y Función de Distribución Acumulativa Complementaria (CCDF, *Complementary Cumulative Distribution Function*).

Requerimiento 8: definir procedimientos de control de calidad de resultados y flexibilidad para realizar futuros cambios o actualizaciones.

Requerimiento 9: elaboración de un código funcional y eficiente.



2.2.2 Diseño

Esta fase tiene como finalidad planear y crear soluciones que permitan obtener un producto bien definido y acorde a lo requerido. De este modo, se propone construir un modelo de simulación que logre representar una red móvil celular, que permita la configuración e interacción de diferentes elementos de red, y así lograr obtener resultados confiables.

2.2.2.1 Definición del modelo del sistema

El escenario se caracteriza por una arquitectura de red heterogénea (HetNet) de dos niveles: en el nivel superior conformada por una macro estación base y un macro-usuario (MU); y en el nivel inferior por numerosas femtoceldas, distribuidas de manera uniforme y cada una asociada a un femto-usuario (FU).

Para realizar el presente análisis de interferencia co-canal (CCI) se consideraron dos tipos de escenarios: primero sin coordinación, en donde las femtoceldas no emplean mecanismos de coordinación y actúan de manera independiente, es decir, sin comunicación entre ellas ni con la macro estación base; y por otro lado el escenario coordinado donde cada femtocelda esta auto organizada, soportada por mecanismos de coordinación y radio cognitiva, reduciendo la interferencia generada hacia el nivel superior, y en consecuencia incrementando la calidad de servicio que brinda la macro estación base al macro-usuario (MU).

Por otra parte, los mecanismos de coordinación de interferencia co-canal (CCI) que serán implementados eventualmente por cada una de las femtoceldas son los siguientes: control ideal de potencia, control de potencia discreto, Regiones de Exclusión Dinámica (DER, *Dynamic Exclusion Regions*), y regiones de exclusión dinámica con control ideal de potencia.

Ahora bien, para desarrollar la simulación de forma clara y ordenada, se contemplan una serie de procesos que permiten la caracterización y formalización de la misma, a fin de abstraer importantes resultados y obtener una evaluación y análisis del objeto de estudio en el presente trabajo de grado:

1. Creación del escenario de simulación, donde se definen dimensiones y actores.
2. Ubicación de la macro estación base y el macro-usuario (MU) (nivel superior).



3. Despliegue aleatorio de femtoceldas y sus respectivos femto-usuarios (FU)¹⁰ (nivel inferior).
4. Especificación de parámetros característicos de cada uno de los participantes y/o elementos como: macro-usuario (MU), macro estación base, femtoceldas y femto-usuario (FU).
5. Calculo de pérdidas de propagación que afectan a las señales interferentes desde cada femtocelda hasta el macro-usuario (MU).
6. Determinación de la interferencia co-canal (CCI) total presente en el sistema percibida por el macro-usuario (MU).
7. Presentación de resultados por medio de la función de densidad de probabilidad (PDF), la función de distribución acumulativa (CDF) y la función de distribución acumulativa complementaria (CCDF), las cuales modelan la interferencia co-canal (CCI) y la relación señal interferencia.
8. Calcular la relación señal a interferencia (SIR) obtenida por el macro-usuario (MU).
9. Calcular la probabilidad de degradación del servicio brindado al macro-usuario (MU).
10. Ejecutar mecanismos de gestión de interferencia, tales como control ideal de potencia, control de potencia discreto, regiones de exclusión dinámica (DER).
11. Calcular el valor de la relación señal a interferencia (SIR) obtenida por el macro-usuario (MU) y definir la probabilidad de degradación del servicio brindado al macro-usuario (MU) al aplicar los diferentes mecanismos de coordinación de interferencia.
12. Calcular la probabilidad de degradación del servicio e interferencia co-canal (CCI) percibida por el macro-usuario (MU) al aplicar los diferentes mecanismos de coordinación de interferencia.
13. Escoger las gráficas estadísticas más importantes de los resultados obtenidos por simulación y realizar su respectivo análisis.

¹⁰ Usuario registrado y atendido por alguna femtocelda desplegada en el escenario de simulación.



2.2.2.2 Consideraciones de simulación

Para establecer un ambiente de simulación acorde con las necesidades y objetivos que conciernen en este trabajo de grado se definen ciertos aspectos importantes que definen el comportamiento de la red heterogénea (HetNet) móvil celular, por lo tanto, los supuestos considerados son:

I. Método de acceso de usuarios a la femtocelda

La elección del método de acceso es muy importante en el proceso de diseño de una red heterogénea (HetNet), ya que a partir de éste se tiene conocimiento de la forma, restricción y tipo de servicio que los usuarios recibirán, por consiguiente, en esta simulación se consideró que las femtoceldas deben estar configuradas con acceso cerrado como política de servicio, por lo tanto cada una solo atenderá a su respectivo femto-usuario (FU).

II. Estrategia de gestión de espectro

En el proceso de diseño, la estrategia de gestión de espectro debe ser estudiada y definida lo más convenientemente posible, debido a que con ésta se puede determinar la eficiencia espectral y la cantidad de interferencia co-canal (CCI) introducida por todos los nodos que brindan servicio en el sistema, y en consecuencia determinar el nivel de desempeño de la red; en otras palabras, calidad, capacidad y cobertura.

En el presente diseño se empleó el método espectro compartido, permitiendo que tanto los nodos del nivel superior como los del nivel inferior de la red heterogénea (HetNet) utilicen el mismo rango de frecuencias en su operación, teniendo como ventaja el incremento de la eficiencia espectral, debido a que los nodos de servicio tienen en todo momento acceso a cualquier frecuencia del espectro y como desventaja el incremento de interferencia co-canal (CCI), la cual debe ser manejada eficientemente para que el desempeño de la red no se vea afectado considerablemente.

III. Tipo de interferencia de estudio

Debido a que el método de acceso a las femtoceldas es acceso cerrado y el espectro de la red es compartido, el tipo de interferencia más influyente en el desempeño del sistema y por lo tanto el objeto de estudio del presente trabajo de grado es la interferencia co-canal entre niveles (CTI) en el enlace de bajada, en la cual todas las comunicaciones



entre las femtoceldas y sus respectivos femto-usuarios (FU) interferirán al macro-usuario (MU), degradando su servicio cuando se incremente considerablemente la interferencia.

IV. El ruido térmico despreciable en comparación con interferencia co-canal

Como consecuencia del despliegue de numerosas femtoceldas en el escenario de estudio, la interferencia co-canal (CCI) será mucho mayor que el ruido térmico y por tal razón se asumirá despreciable para todos los cálculos.

V. Aspectos generales

- Se asume que los nodos interferentes no pueden estar a una distancia definida menor (R_m) del macro-usuario (MU) interferido.
- La macro estación base opera a una distancia r_0 fija del macro-usuario (MU).
- No se usa grilla tipo Manhattan.
- Se considera que las antenas son omnidireccionales con un determinado valor de ganancia.
- En cada transmisión entre las femtoceldas y sus respectivos femto-usuarios (FU) se planifican todos los parámetros de transmisión.
- Cada femtocelda está asociada a un femto-usuario (FU) que se encuentra a una distancia específica, y por lo tanto se tiene una comunicación activa. Las femtoceldas son distribuidas de manera uniforme dentro del escenario.
- Se asume que en la macro estación base, las femtoceldas y los usuarios no tienen más de una antena, es decir, no se considera ningún tipo de ganancia por diversidad.
- No se consideran traspasos entre femtoceldas, debido a que la simulación es estática.
- No se considera ningún tipo de pérdidas adicionales.



2.2.2.3 Modelo de propagación

Existen diferentes modelos de propagación que permiten representar las características propias de un canal en particular por medio de expresiones matemáticas, los cuales difieren dependiendo del escenario de implementación. En el presente trabajo de grado se considera que las comunicaciones entre los nodos de servicio (macro estación base, femtocelda) y el macro-usuario (MU) son afectadas por pérdidas de propagación, desvanecimiento por sombra o desvanecimiento rápido, tal como se presenta en la ecuación 2.1 en unidades lineales,

$$l = d_j^{(\alpha)} X, \quad (2.1)$$

donde:

l , representa las pérdidas de propagación.

$d_j^{(\alpha)}$, representa un modelo básico sencillo de propagación en función de la distancia y el exponente de propagación (α), el cual caracteriza las pérdidas de propagación que afectan la señal interferente desde cada una de las femtoceldas hasta el macro-usuario (MU) y desde la macro estación base hasta el macro-usuario (MU), permitiendo definir la SIR. La Tabla 2.1 [40] presenta los valores que la variable α puede tomar dependiendo del tipo de escenario en el que se despliegue la red. Cabe resaltar que este modelo no tiene en cuenta el valor inicial L_0 en comparación al modelo de pendiente única [41], disminuyendo las pérdidas de propagación (ver Anexo 1).

X , es una variable aleatoria que permite representar dos tipos diferentes de desvanecimiento, primero el desvanecimiento lento o por sombra, modelado con una distribución de probabilidad Log – Normal, de acuerdo a la ecuación 2.2 (ver Anexo 2.1). Y segundo el desvanecimiento rápido modelado por la distribución Rayleigh [42] (ver Anexo 2.2).

$$f(x; \mu, \sigma) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} & , x > 0 \\ 0 & , x \leq 0, \end{cases} \quad (2.2)$$



donde:

μ , media representadas en unidades lineales.

σ , desviación estándar en unidades lineales.

La ecuación 2.3 presenta la función de densidad de probabilidad (PDF) de la distribución Rayleigh, la cual permite modelar el desvanecimiento rápido por medio de la variable X ,

$$f(x; \sigma) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} & , x \geq 0 \\ 0 & , x < 0, \end{cases} \quad (2.3)$$

donde:

$$E[X] = \sigma \sqrt{(\pi/2)}, \quad (2.4)$$

representa el valor esperado de la variable aleatoria X .

Escenario	Exponente de Propagación (α)
Edificio o Casa (Con visión directa)	1.6 – 2
Espacio Libre	2
Área Urbana	2.7 – 3.5
Zona de Sombra Urbana	3 – 5
Línea de Vista en Edificios	1.6 - 1.8
Obstrucciones por Construcciones	4 – 6
Obstrucciones por Fabricas	2 -3
Edificio o Casa (Sin visión directa)	2 -- 4
Edificio o Casa de 2 o 3 Pisos (Sin visión directa)	4 -- 6

Tabla 2.1 Exponente de pérdidas de propagación.



2.2.2.4 Interferencia Co-canal

La interferencia co-canal se define como la señal interferente generada por estaciones base en distintas celdas que operan en la misma frecuencia, en este caso las señales interferentes provienen de las femtoceldas y afectan las comunicaciones entre la macro estación base y el macro-usuario (MU). De esta forma, por medio de la ecuación 2.5 se obtiene la potencia de las señales interferentes percibidas por el macro-usuario (MU) provenientes de cada una de las femtoceldas en unidades lineales,

$$P_{Rxj} = P_j d_j^{-\alpha} X , \quad (2.5)$$

dónde:

i_j , potencia interferente recibida de la j-ésima femtocelda en vatios.

p_j , potencia de transmisión de la j-ésima femtocelda en vatios.

d_j , distancia entre el transmisor y receptor (macro-usuario) en metros.

α , exponente de propagación.

X , desvanecimiento.

Luego, teniendo en cuenta la potencia de cada señal interferente percibida por el macro-usuario (MU), se calcula la interferencia co-canal (CCI) presente el sistema percibida por el macro-usuario (MU) generada por cada una de las n femtoceldas desplegadas en el escenario, tal como se presenta en la ecuación 2.6,

$$cci = \sum_{j=1}^n i_j . \quad (2.6)$$

2.2.2.5 Relación señal a interferencia

El cálculo y estudio de la relación señal a interferencia (SIR) presente en la red heterogénea (HetNet) es de gran importancia, debido a que ésta permite determinar la probabilidad de degradación y calidad del servicio.

La ecuación 2.7 permite calcular el valor de la relación señal a interferencia más ruido (SINR) en unidades lineales percibida por el macro-usuario (MU) en un determinado momento, estableciendo una relación entre la potencia de la señal recibida por el macro-



usuario (MU) proveniente de la macro estación base y la suma de las potencias recibidas de señales interferentes procedentes de cada una de las femtoceldas, más la potencia de ruido térmico,

$$s_{ir_{Macro\ Usuario}} = \frac{P_{Rx_macro_usuario}}{cci}, \quad (2.7)$$

donde:

$s_{ir_{Macro\ Usuario}}$, valor de relación señal a interferencia (SIR) percibida por el macro-usuario (MU) conectado a la macro estación base.

$P_{Rx_macro_usuario}$, potencia de la señal recibida por el macro-usuario (MU) proveniente de la macro estación base en vatios.

cci , potencia de interferencia co-canal total recibida por el macro-usuario (MU) en vatios.

La potencia recibida por el macro-usuario (MU) proveniente de la macro estación base, se determina a partir de la potencia de transmisión, las ganancias de antenas y las pérdidas de propagación, tal como se presenta en las ecuaciones 2.8,

$$P_{Rx_Macro-usuario} = P_{Tx_Macro_estación_base} \frac{g_{Tx_Macro_estación_base} g_{Rx_Macro_usuario}}{l}, \quad (2.8)$$

donde:

$P_{Rx_Macro-usuario}$, potencia recibida por el macro-usuario (MU) proveniente de la macro estación base en vatios.

$P_{Tx_Macro_estación_base}$, Potencia de transmisión de la macro estación base en vatios.

$g_{Tx_Macro_estación_base}$, ganancia antena en transmisión de la macro estación base en veces.

$g_{Rx_Macro_usuario}$, ganancia antena en recepción del macro-usuario (MU) en veces.

l , pérdidas de propagación con modelo de pendiente única.



2.2.2.6 Probabilidad de degradación

A partir del valor de relación señal a interferencia (SIR) en el macro-usuario (MU), se determina la probabilidad de degradación del servicio, estableciendo un valor de relación señal a interferencia (SIR) objetivo igual a $\gamma = 0 \text{ dB}$ que representa el valor mínimo de SIR que el macro-usuario (MU) debe percibir, para que la calidad del servicio prestado por la macro estación base no se afecte, tal como se presenta en la ecuación 2.10. La probabilidad de degradación de servicio se obtiene para los escenarios con y sin coordinación,

$$\text{Probabilidad de Degradación} \begin{cases} \text{si } \text{sir}_{\text{Macro Usuario}} < \gamma, \text{Estado } 1 \\ \text{si } \text{sir}_{\text{Macro Usuario}} \geq \gamma, \text{Estado } 0 \end{cases}, \quad (2.10)$$

donde:

1, representa el hecho de que la relación señal a interferencia (SIR) percibida por el macro-usuario (MU) está por debajo del valor de SIR objetivo (0 dB) y por lo tanto el servicio brindado al macro-usuario (MU) se degrada.

0, representa el hecho de que la relación señal a interferencia (SIR) percibida por el macro-usuario (MU) se encuentra igual o por encima del umbral o SIR objetivo (0 dB), y en consecuencia la macro estación base continua conectado y prestando servicio de calidad.

2.2.3 Implementación

Esta fase está dedicada a la especificación de importantes procesos ligados al desarrollo de la simulación del presente trabajo de grado. En primer lugar, la selección de la herramienta de la simulación más conveniente, posteriormente definir parámetros específicos de simulación y luego el modelado de mecanismos de coordinación, todo esto con el fin de implementar y validar el código que permitirá evaluar la interferencia co-canal (CCI) percibida por un macro-usuario (MU) en una red heterogénea (HetNet) móvil; y determinar el impacto de algunos mecanismos de coordinación en la reducción del nivel de interferencia co-canal (CCI) presente en el sistema.



2.2.3.1 Herramienta de simulación

➤ Scilab®



Figura 2.2 Mascota de Scilab dedicada a fomentar el espíritu del software libre para computación numérica.

El proceso de selección de la herramienta de simulación es de gran importancia, ya que con la ayuda de ésta, se cumplen los objetivos propuestos, ahora bien, después de profundizar en los temas propios de este estudio y obtener un esquema claro de lo que se necesita simular, el interés se centró en la interpretación del problema planteado, los retos matemáticos que podrían surgir y las necesidades graficas indispensables para el correcto análisis de resultados.

De acuerdo a lo anterior, se analizó profundamente cada una de las herramientas disponibles (Matlab¹¹, Octave¹², Maxima¹³, etc) y se llegó a la conclusión de que Scilab®¹⁴ [43] es suficiente para los requerimientos del trabajo de grado, ofrece las herramientas de cálculo y visualización necesarias, no sobrecarga los equipos y es un software libre. Scilab fue desarrollado en 1990 por el Instituto Francés de Investigación en Informática y Automática (INRIA, *Institut National de Recherche en Informatique et Automatique*) y la Escuela Nacional de Puentes y Calzadas (ENPC, *École Nationale des Ponts et Chaussées*), el cual tiene la filosofía de código abierto, es decir que se puede distribuir y modificar libremente, además brinda un entorno de programación amigable, el cual permite el modelado, compilación y simulación de diferentes tipos de sistemas en tiempo discreto o continuo, con posibilidad de generar graficas 2D y 3D.

¹¹ <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

¹² <http://www.gnu.org/software/octave/>

¹³ <http://www.maxima.sourceforge.net/>

¹⁴ <http://http://www.scilab.org>

2.2.3.2 Parámetros del sistema

El escenario de simulación está constituido en primer lugar por una macrocelda con dimensiones de 200 m de ancho por 200 m de largo, con un área total de 40000 m cuadrados.

Dentro de ésta se encuentra ubicado un macro-usuario (MU) en el centro u origen, que a su vez está siendo atendido por una macro estación base a una distancia fija r_0 , con una potencia de transmisión igual a 100 mW (20 dBm). Adicionalmente se distribuyen entre 40 y 400 femtoceldas de manera aleatoria uniforme en todo el escenario, las cuales brindan servicio a un femto-usuario (FU) ubicado a una distancia variable entre 1 m y 8 m de su respectiva femtocelda, con una potencia de transmisión igual a 10 mW (10 dBm). Como parámetro adicional se configura la distancia mínima (R_m) y máxima (R_M) de las femtoceldas con respecto al macro-usuario (MU) igual a 1 m y aproximadamente 100 m respectivamente.

La figura 2.3 presenta de manera general el escenario de análisis.

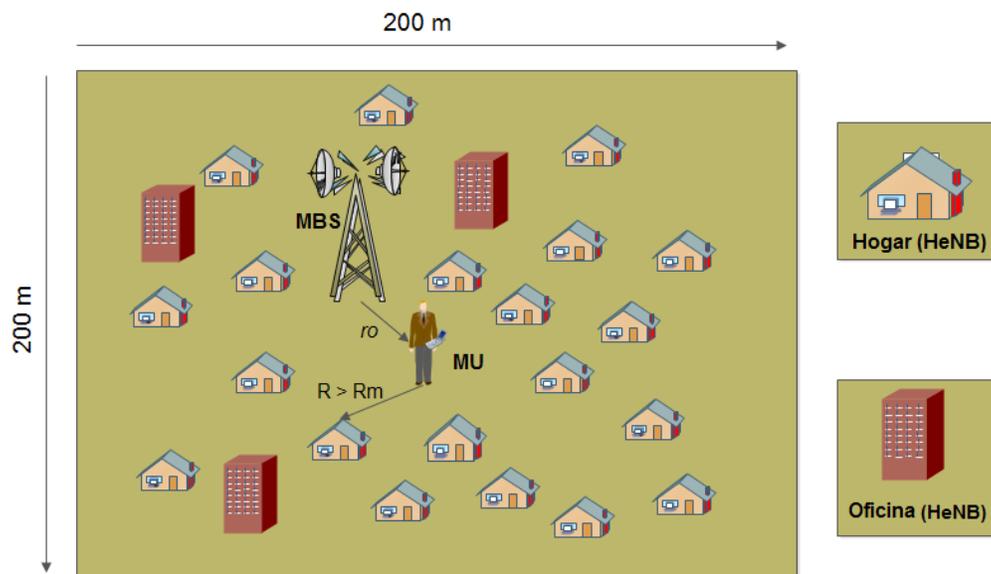


Figura 2.3 Escenario de análisis.

La figura 2.4 muestra cómo cada femtocelda se encuentra en comunicación activa con el femto-usuario (FU), operando en la misma frecuencia utilizada por la macro estación base (espectro compartido), por lo tanto generan interferencia co-canal inter-nivel al macro-usuario (MU), degradando el servicio ofrecido por la macro estación base.

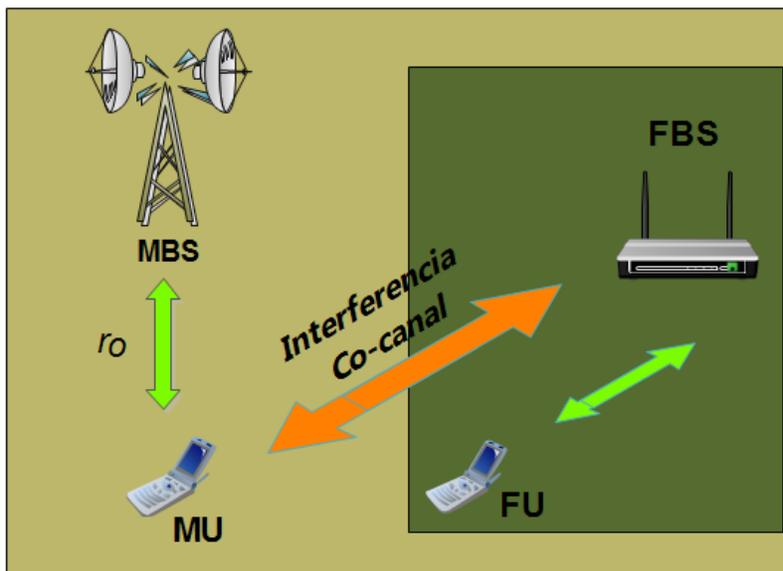


Figura 2.4 Escenario de interferencia inter nivel.

Con respecto al modelo de propagación, el exponente de propagación (α) es igual a 3, debido a que el escenario es micro urbano. El desvanecimiento lento o por sombra se modela con una media (μ) igual a 0 dB y desviación estándar (σ) igual a 6 dB, y para el caso del desvanecimiento rápido se modela por medio de la distribución Rayleigh. Se definen las Mínimas Perdidas de Acoplamiento (MCL, *Minimum Coupling Loss*) entre la femtocelda y el macro-usuario (MU) igual a 14 dB y entre la macro estación base y el macro-usuario (MU) igual a 20 dB; 6 dB más que entre la femtocelda y el macro-usuario (MU) debido a la ubicación y altura de las antenas. No se consideran pérdidas ocasionadas por los materiales con las cuales están construidas las edificaciones donde se encuentran las femtoceldas, ni por elementos pasivos.

El sistema se configura para operar en un ancho de banda de 5 MHz, aparte de esto, tanto la macro estación base como las femtoceldas emiten y reciben las señales de información con antenas cuya ganancia es igual a 0 dBi.

Se establece el umbral de coordinación (P_{Umbral}) igual a -40 dBm, el cual define un valor de sensibilidad para todas las femtoceldas, de tal manera que, si la potencia de la señal de aviso proveniente del macro usuario (MU) percibida por la femtocelda es mayor, ella aplica mecanismos de coordinación.

La tabla 2.2 presenta en resumen los parámetros de funcionamiento de la macro estación base y de las femtoceldas.



	Macro Estación Base	Femto Estación Base
Radio de Cobertura	100 m	8 m
Potencia Máxima de Transmisión	21 dBm	10 dBm
Mínimas Perdidas de Acoplamiento	14 dB	20 dB
Perdidas Adicionales	0 dB	0 dB
Ganancia de Antena	0 dBi	0 dBi

Tabla 2.2 Parámetros macro estación base y femto estación base.

La tabla 2.3 presenta en resumen los parámetros considerados para el sistema.

	Sistema
Escenario	Micro celular urbano
Exponente de Propagación	3
Tipos de Desvanecimiento	Lento – rápido
Tipo de Interferencia	Inter-nivel
Método de Acceso de la Femto Estación Base	Cerrado
Frecuencia de Operación	1 GHz
Técnica de Gestión de Espectro	Espectro compartido
Umbral de Coordinación	-40 dBm
Ancho de Banda	5 MHz

Tabla 2.3 Parámetros generales del sistema.



2.2.3.3 Mecanismos de coordinación

Uno de los objetivos del presente trabajo de grado es hacer uso de mecanismos que ayuden a mitigar la interferencia co-canal (CCI) generada por las femtoceldas hacia el macro-usuario (MU), tratando de cambiar el hecho de que en principio operan individualmente, sin ninguna coordinación de operación entre ellas.

La idea general de ésta gestión, es que cuando el nivel de interferencia hacia el macro-usuario (MU) atendido por la macro estación base sea tal que la calidad del servicio se vea degradada considerablemente, el usuario emita una señal de aviso, dando a entender a las femtoceldas próximas a él que deben inmediatamente gestionar sus recursos, tanto de potencia como frecuencia y así, lograr que el macro-usuario (MU) no se desconecte de la macro estación base y en consecuencia se presente interrupción del servicio.

Para realizar la gestión de recursos radio (RRM) se deberán ejecutar algunos procedimientos de coordinación que permitirán definir la acción y funcionamiento de los mecanismos de coordinación de interferencia co-canal, los cuales se explican a continuación.

I. *Descubrimiento de usuario*

Este procedimiento es de vital importancia ya que de éste depende que las femtoceldas próximas al macro-usuario (MU) tengan conocimiento de que están interfiriendo y comiencen a actuar.

Para este propósito, en el presente trabajo de grado el macro-usuario (MU) intencionalmente emite una señal con una potencia igual a 1 mW (0 dBm), con el objetivo de que las femtoceldas que perciban tal señal con potencia por encima del valor umbral de coordinación (P_{Umbral}), se auto organicen [44]. La ecuación 2.11 presenta la condición que debe llevarse a cabo en unidades lineales,

$$P_{Aviso} d_j^{(-\infty)} X_j > P_{Umbral}, \quad (2.11)$$

dónde:

P_{Aviso} , es la potencia de la señal de aviso proveniente del macro-usuario (MU) en vatios.

P_{Umbral} , sensibilidad de la femtocelda en vatios.



Para que este proceso sea óptimo, debe planificarse lo más cuidadosamente posible, garantizando que la señal de aviso tenga la potencia adecuada, ya que si es muy alta puede que no todas las femtoceldas que la perciban estén interfiriendo de manera considerable al macro-usuario (MU), disminuyendo la eficiencia espectral y espacial del sistema, y por otro lado si es muy baja, no todas las femtoceldas interferentes la percibirán, permaneciendo la interferencia co-canal (CCI).

De acuerdo con la ecuación 2.12, reemplazando el valor de la potencia de señal de aviso y el valor del umbral de coordinación, cada femtocelda que perciba la señal de aviso por encima de 0.0001 mW (– 40 dBm) tendrá que auto organizarse, haciendo uso de alguno de los mecanismos de coordinación,

$$P_{Aviso} * d_j^{(-\infty)} * X_j > 0.0001 \text{mW} \quad (2.12)$$

II. Regiones de coordinación

Con la ayuda del proceso anterior, y partiendo de que solo algunas femtoceldas percibirán la señal de aviso emitida por el macro-usuario (MU), la región de cobertura de la red (Ψ) se divide en dos regiones, las cuales se denominan regiones de coordinación, donde cada una de éstas es independiente y puede aplicar diferentes mecanismos de coordinación de interferencia.

Las ecuaciones 2.13, 2.14 y 2.15 presentan la forma matemática de la composición de cada región de coordinación:

$$\Psi_1 = \{ \text{Femtoceldas} \in \Psi \mid (P_{Aviso} * d_j^{(-\infty)} * X_j) > \delta_{umbral} \} ; \quad (2.13)$$

$$\Psi_2 = \{ \text{Femtoceldas} \in \Psi \mid (P_{Aviso} * d_j^{(-\infty)} * X_j) < \delta_{umbral} \} , \quad (2.14)$$

luego,

$$\Psi = \Psi_1 \cup \Psi_2 , \quad (2.15)$$

La primera región (ψ_1) representa las femtoceldas que detectan la señal de aviso, es decir que la potencia de dicha señal está por encima del umbral establecido; por otro lado la segunda región (ψ_2) representa las femtoceldas que no perciben la señal de aviso [44].

La figura 2.5 permite observar cada una de las regiones de coordinación y también la ubicación del macro-usuario (MU).

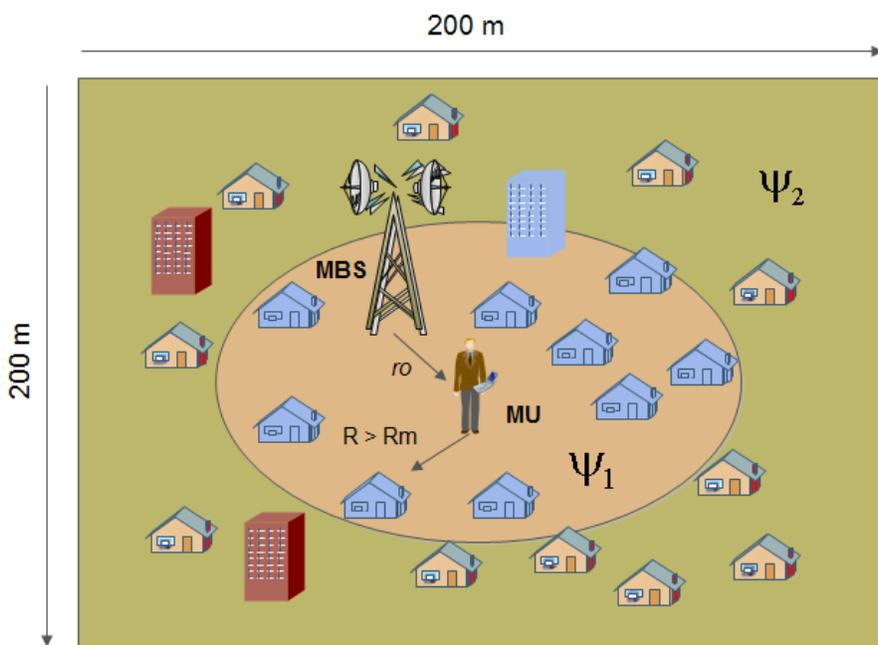


Figura 2.5 Regiones de coordinación.

En la figura 2.5 las femtoceldas ubicadas en casas y edificios de color azul dentro del círculo representan la primera región de coordinación (ψ_1), mientras que las femtoceldas ubicadas en casas de color rosado y edificios de color rojo fuera del círculo representan la segunda región de coordinación (ψ_2) y por último el personaje de traje café es el macro-usuario (MU).

Debido a que en el escenario de simulación, la señal de aviso del macro-usuario (MU) también experimenta desvanecimiento lento o rápido modelado por una variable aleatoria, es muy probable que, o bien, algunas femtoceldas que estén cerca no la perciban o que algunas femtoceldas considerablemente alejadas la perciban, creando irregularidad en la conformación de las regiones de coordinación. Este efecto se puede apreciar en la figura 2.6, donde algunas casas y edificios azules están por fuera de la primera región de

coordinación y algunas casas de color rosado están dentro de la primera región de coordinación.

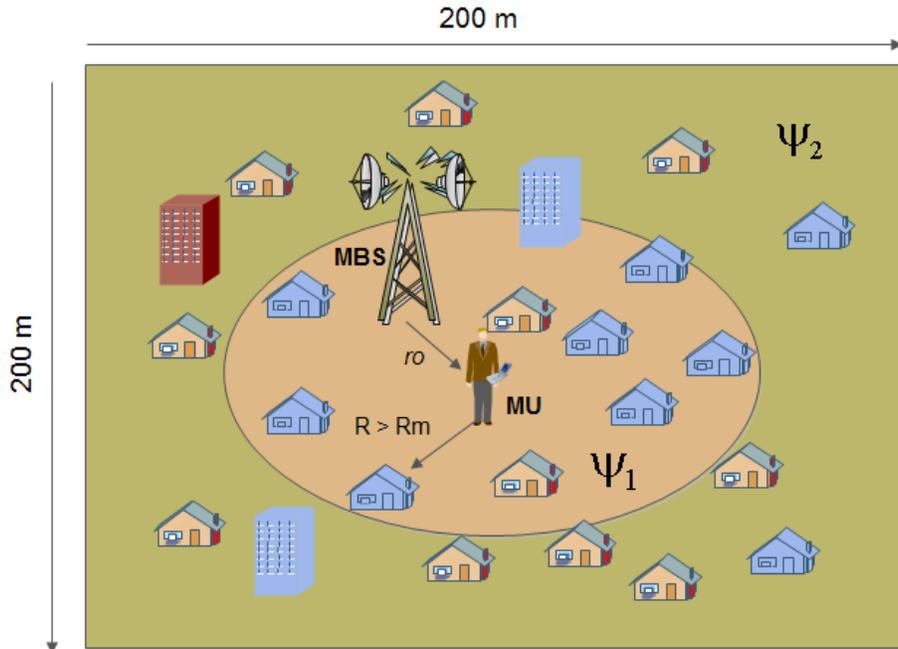


Figura 2.6 Regiones de coordinación con desvanecimiento.

Después de haber expuesto los procedimientos de coordinación, se presentan diferentes variantes de mecanismos de coordinación de interferencia utilizados por las femtoceldas, procurando disminuir la interferencia percibida por el macro-usuario (MU) [45].

2.2.3.3.1 Control ideal de potencia

En este caso, el control ideal de potencia se realizó en las dos regiones de coordinación, con el objetivo de disminuir el nivel de potencia de transmisión de todas las femtoceldas. Este mecanismo de coordinación de interferencia se basa en el conocimiento de las pérdidas de propagación, mínimas pérdidas de acoplamiento y el desvanecimiento en la comunicación entre la femtocelda y el femto-usuario (FU) para obtener el valor de la potencia de trasmisión adecuado que debe utilizar cada femtocelda para servir a los femto-usuarios (FU) con un nivel de potencia de -20 dBm.



2.2.3.3.2 Control de potencia discreto

En este caso, el procedimiento de regiones de coordinación es de gran importancia, ya que de éste se infiere cuáles de las femtoceldas desplegadas en el escenario deben aplicar control de potencia discreto, de la siguiente manera:

- I. Para la primera región de coordinación (ψ_1), debido a que en ésta se encuentran las femtoceldas más próximas al macro-usuario (MU) se aplica control de potencia discreto, en el cual se reduce la potencia de transmisión de las femtoceldas en 3 dB o 6 dB, transmitiendo con un nuevo valor de potencia P' , tal como se presenta en las ecuaciones 2.16 y 2.17,

$$P' [dBm] = P_i [dBm] - 3dB ; \quad (2.16)$$

$$P' [dBm] = P_i [dBm] - 6dB . \quad (2.17)$$

- II. En la segunda región de coordinación (ψ_2), debido a que las femtoceldas no escuchan la señal de aviso proveniente del macro-usuario (MU), no se aplica control de potencia discreto.

2.2.3.3.4 Regiones de exclusión dinámica

El funcionamiento de regiones de exclusión dinámica (RED) esta soportado por el proceso de regiones de coordinación, pero a diferencia de los anteriores mecanismos (control ideal de potencia y control de potencia discreto), éste está basado en la re-asignación del espectro, donde cada femtocelda ubicada en la primera región de coordinación cambia su frecuencia de operación a alguna de las frecuencias disponibles, es decir cuando las femtoceldas perciben la señal de aviso del macro-usuario (MU) por encima del umbral de coordinación, rápidamente cambian la frecuencia en la que están operando por una que la macro estación base no esté utilizando ni vaya a utilizar, dejando de interferir al macro-usuario (MU), y en consecuencia reduciendo la interferencia co-canal (CCI) total hacia el macro-usuario (MU).

En el caso de la segunda región de coordinación, debido a que las femtoceldas no perciben la señal de aviso del macro-usuario (MU), no cambian la frecuencia en la que están operando, por lo que siguen generando interferencia co-canal (CCI).

Como conclusión de este mecanismo, en la figura 2.7 y ecuación 2.18 se aprecia que solamente contribuyen a la interferencia co-canal (CCI) las femtoceldas ubicadas en la segunda región de coordinación y algunas femtoceldas que por motivos de desvanecimiento no perciben la señal de aviso, de esta forma,

$$cci = \sum_j i_j \in \Psi_2 . \quad (2.18)$$

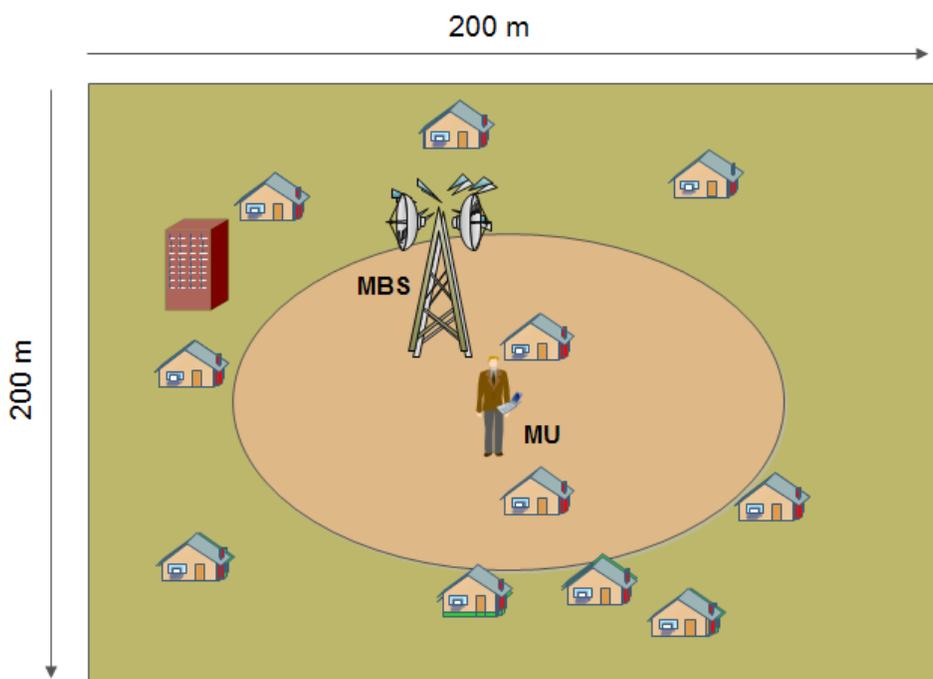


Figura 2.7 Regiones de exclusión dinámica.

2.2.3.3.5 Regiones de exclusión dinámica y control ideal de potencia

Para este caso se combinan las ventajas del control ideal de potencia y regiones de exclusión dinámica. Con la ejecución de estos dos mecanismos de coordinación se espera la mayor mitigación de interferencia co-canal (CCI), ya que el sistema contará por un lado con la re-assignación de espectro y por otro lado con la configuración de cada



femtocelda para que transmita su señal con la potencia adecuada, Lo que en definitiva incrementa la calidad del servicio brindado al macro-usuario (MU).

Debido a que en este caso se aplican dos mecanismos diferentes de coordinación, suceden diferentes situaciones en cada una de las dos regiones de coordinación:

- I. En la primera región de coordinación (ψ_1), las femtoceldas ubicadas en casas y edificios identificadas en la figura 2.8 de color azul, se aplica el mecanismo de regiones de exclusión dinámica, cambiando de frecuencia de operación tan pronto escuchen la señal de aviso del macro-usuario (MU).
- II. En la segunda región de coordinación (ψ_2), las femtoceldas ubicadas en casas y edificios identificadas en la figura 2.8 de color verde, no perciben la señal de aviso del macro-usuario (MU), por tanto realizan control ideal de potencia, transmitiendo con la potencia adecuada, limitando aún más la interferencia presente en el sistema.

En otras palabras en la ecuación 2.19 se puede apreciar el nivel de potencia total de interferencia co-canal (CCI) recibido por el macro-usuario (MU),

$$cci = \sum_j i_j \in \psi_2, \quad (2.19)$$

donde:

$i_j \in \psi_2$, representan la potencia recibida por el macro-usuario (MU) de las femtoceldas ubicadas en la segunda región de coordinación aplicando control ideal de potencia.

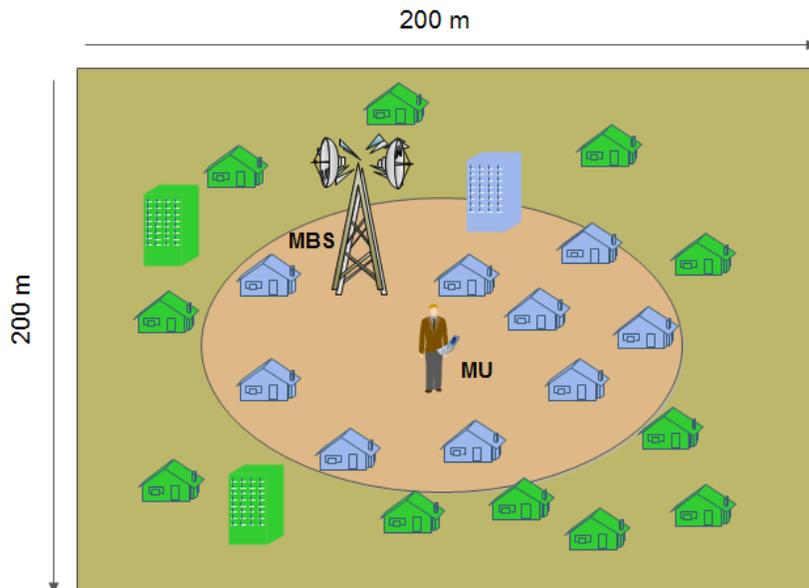


Figura 2.8 Regiones de exclusión dinámica y control ideal de potencia.

Finalmente el efecto del mecanismo de coordinación se aprecia en la figura 2.9, donde en la segunda región todas las femtoceldas ejecutan un control ideal de potencia y en la primera región solo interferirán algunas femtoceldas que por motivos de desvanecimiento no percibieron la señal de aviso.

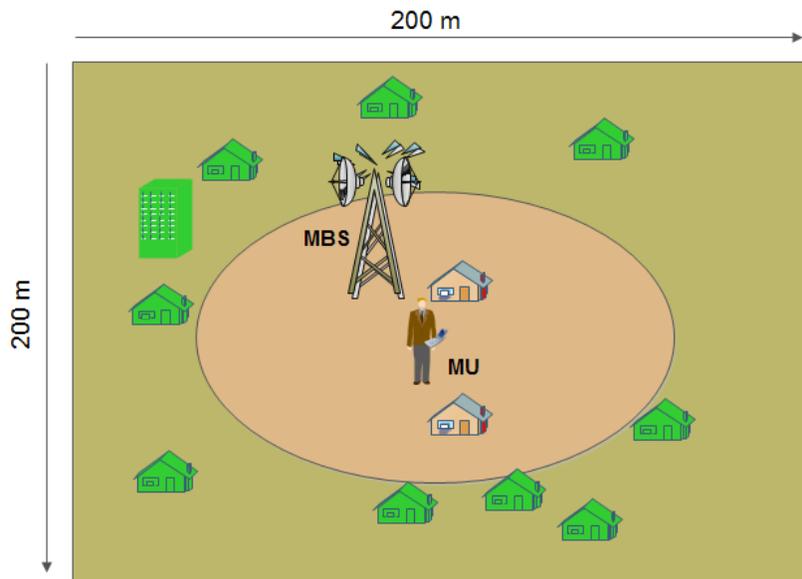


Figura 2.9 Regiones de exclusión dinámica y control ideal de potencia.



2.2.4 Escenarios de Pruebas

En esta fase se acordó y realizó un plan de pruebas para la simulación estática a nivel de sistema siguiendo el método Montecarlo¹⁵, en donde los procesos que componen la simulación tienen que ejecutarse cuantas veces sea necesario hasta obtener una muestra estadísticamente representativa, luego con base en el análisis de estos resultados provenientes de la interacción de todos los elementos que componen la red, se pueden extraer una serie de valores y datos importantes que permiten el análisis del desempeño de la red y en particular el nivel de interferencia presente en el escenario, como también el efecto de la auto organización de las femtoceldas soportadas por mecanismos de coordinación.

Para el presente trabajo de grado, por medio de diferentes pruebas realizadas al modelo de simulación, se definió que 10,000 ejecuciones son suficientes para obtener resultados que presenten una tendencia estadística definida.

Considerando que el sistema es estocástico, es decir que en el proceso de simulación existen variables aleatorias y que todos los escenarios de pruebas se diseñaron considerando dos tipos de desvanecimiento distintos (lento y rápido), indudablemente se obtendrán resultados diferentes y en consecuencia conclusiones diferentes. Con el fin de analizar a profundidad el problema de la interferencia co-canal (CCI) se construyó un plan de pruebas compuesto por tres diferentes escenarios en donde se evaluarán diferentes condiciones y parámetros de sistema, y así analizar con detalle el comportamiento de la red heterogénea (HetNet).

La tabla 2.4 presenta el plan de pruebas. En todos los escenarios el macro-usuario (MU) se encuentra ubicado en el centro de la celda.

¹⁵ El método Montecarlo es un método numérico que permite resolver problemas físicos y matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias. El método es aplicable a cualquier tipo de problema, ya sea estocástico o determinístico y es muy utilizado en los lenguajes de programación para hallar la probabilidad de un suceso.



Escenario	Descripción	Control de Potencia	Control de Frecuencia	λ (Densidad de Femtoceldas)	r_0 (m)
1	Despliegue de Solo Femtoceldas	NO	NO	100, 400	-
		SI	NO	100, 400	-
		NO	SI	100, 400	-
		SI	SI	100, 400	-
2	Despliegue de Femtoceldas y Macro Estación Base	NO	NO	100, 400	5, 10, 15, 20, 25
		SI	NO	100, 400	5, 10, 15, 20, 25
		NO	SI	100, 400	5, 10, 15, 20, 25
		SI	SI	100, 400	5, 10, 15, 20, 25
3	Despliegue de Femtoceldas y Macro Estación Base	NO	NO	40, 80, 120, 160, 200, 240, 280, 320, 360, 400	10
		SI	NO	40, 80, 120, 160, 200, 240, 280, 320, 360, 400	10
		NO	SI	40, 80, 120, 160, 200, 240, 280, 320, 360, 400	10
		SI	SI	40, 80, 120, 160, 200, 240, 280, 320, 360, 400	10

Tabla 2.4 Plan de pruebas.



3. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo contiene la evaluación y análisis de los resultados obtenidos en la simulación básica estática a nivel de sistema implementada con la herramienta Scilab®, donde, por medio del método Montecarlo se ejecutaron 10000 veces cada uno de los escenarios presentados en el capítulo 2, con el fin de caracterizar la interferencia co-canal (CCI) presente en una red heterogénea y obtener la probabilidad de degradación del servicio brindado al macro-usuario (MU), con y sin mecanismos de coordinación.

Los resultados presentados en figuras y tablas a fin de crear un marco de comparación de los diferentes mecanismos de coordinación, hacen uso de la siguiente nomenclatura.

- **CP**: control ideal de potencia.
- **CP (3 dB)**: control de potencia discreto de 3 dB.
- **CP (6 dB)**: control de potencia discreto de 6 dB.
- **RED**: regiones de exclusión dinámica.
- **RED + CP**: regiones de exclusión dinámica con control ideal de potencia.
- **PDF**: función de densidad de probabilidad.
- **CDF**: función de distribución acumulativa.
- **CCDF**: función de distribución acumulativa complementaria.



De manera general, las medidas que permiten realizar el análisis estadístico son:

- **PDF:** indica la probabilidad relativa según la cual cierta variable aleatoria toma un valor específico.
- **CDF:** indica la probabilidad de que cierta variable aleatoria sea menor o igual a un valor específico.
- **CCDF:** indica la probabilidad de que cierta variable aleatoria sea mayor o igual a un valor específico.
- **Moda:** valor con mayor frecuencia en una distribución de datos.
- **Promedio CCI:** relación entre la suma de los valores obtenidos de CCI en cada repetición entre el número de repeticiones.
- **Relación señal a interferencia (SIR):** relación entre la potencia recibida de la señal deseada y la suma de potencias interferentes provenientes de otras comunicaciones.

3.1 ESCENARIO 1.

El objetivo principal de este primer escenario es caracterizar la interferencia co-canal (CCI) total presente en el sistema percibida por el macro-usuario (MU), con y sin la aplicación de los diferentes mecanismos de coordinación antes expuestos.

3.1.1 Cien Femtoceldas Desplegadas.

En el presente escenario de simulación se despliegan 100 femtoceldas, representadas en la primera región de coordinación con color rojo y en la segunda región de coordinación con color blanco, donde el macro-usuario (MU) es el círculo de color azul, tal como se indica en la figura 3.1.

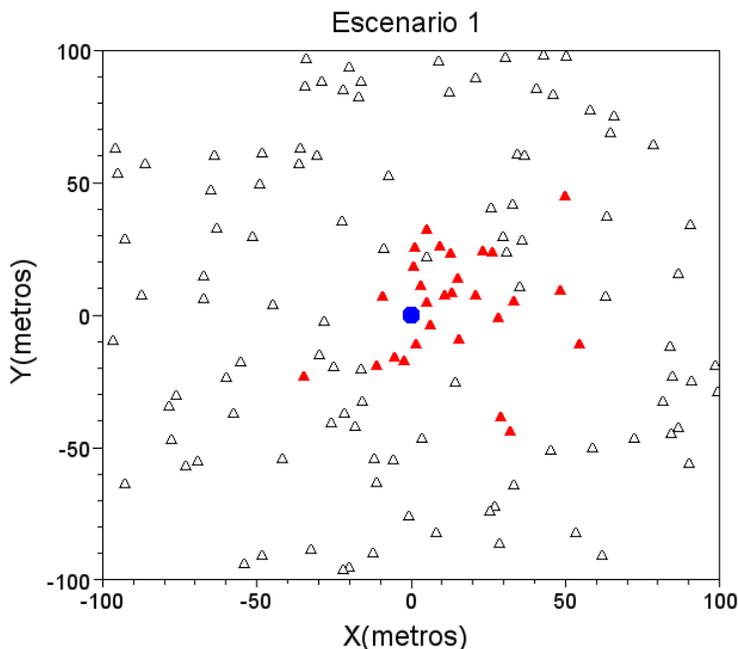
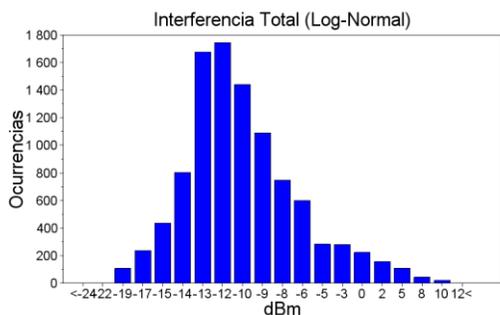


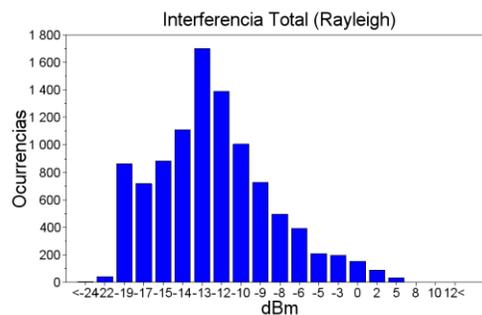
Figura 3.1 Escenario 1 con 100 femtoceldas.

Las figuras 3.2 (a) a la 3.2 (f) y 3.3 (a) a la 3.3 (f) presentan por medio de histogramas, tras simular 10,000 veces el escenario 1 con 100 femtoceldas, el número de veces que la potencia de la interferencia co-canal (CCI) presente en el sistema percibida por el macro-usuario (MU) se encuentra dentro de diferentes rangos establecidos, teniendo en cuenta el desvanecimiento lento (Log-Normal) y desvanecimiento rápido (Rayleigh) con y sin los diferentes mecanismos de coordinación.

El número ubicado en la superficie de cada barra representa un rango de potencias de 0.5 dB por encima y por debajo del mismo. Por ejemplo en el eje x el numero con -12 dBm representa un rango de -12.5 dBm a -11.5 dBm.



(a)

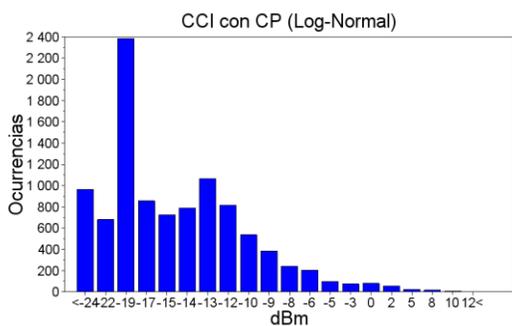


(a)

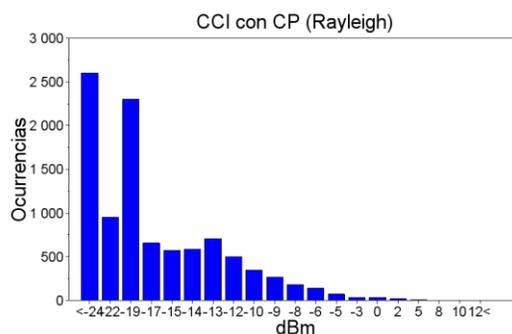


ANÁLISIS DE INTERFERENCIA CO-CANAL EN REDES HETEROGÉNEAS

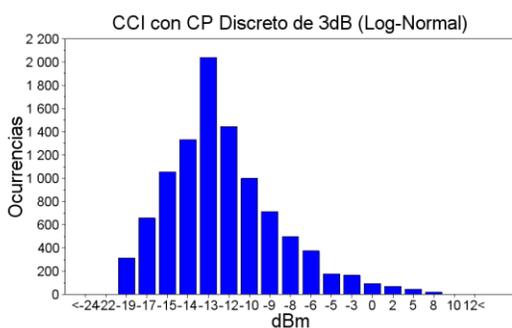
Merly Rocío Martínez Magín – Juan David Valdés Domínguez



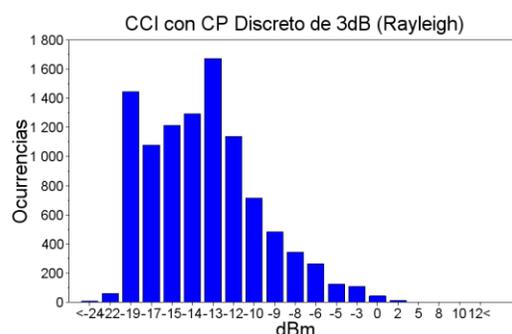
(b)



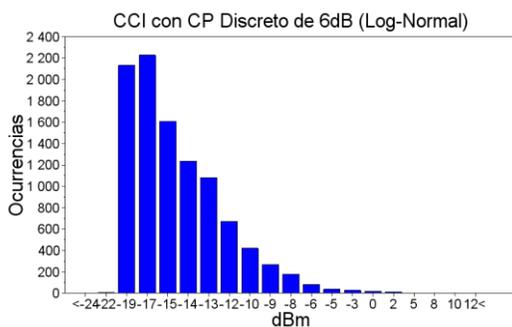
(b)



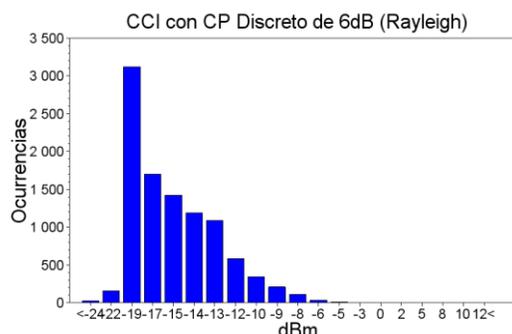
(c)



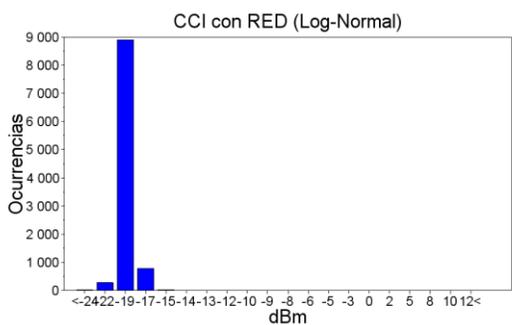
(c)



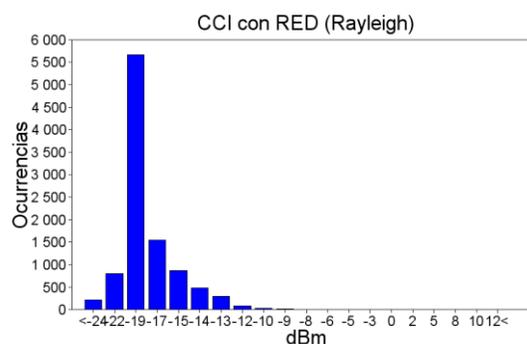
(d)



(d)



(e)



(e)

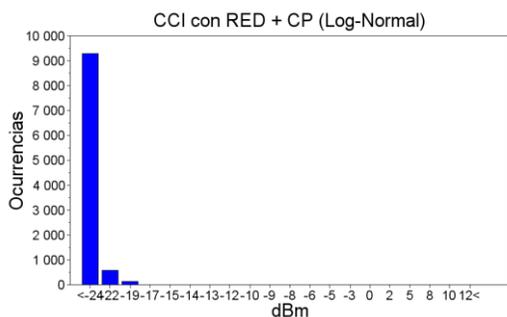


Figura 3.2 Histograma de CCI (Log-Normal)

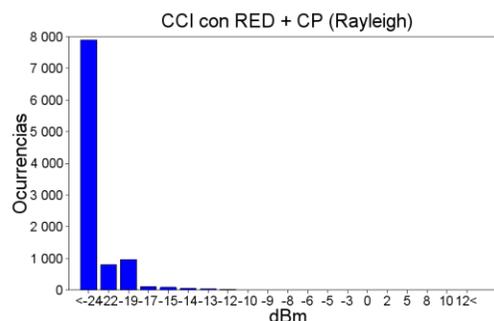


Figura 3.3 Histograma de CCI (Rayleigh)

Las tabla 3.1 y la tabla 3.2 presentan el promedio de la interferencia co-canal percibida por el macro-usuario (MU) y la moda obtenida en el escenario 1 con 100 femtoceldas, teniendo en cuenta el desvanecimiento lento (Log-Normal) y el desvanecimiento rápido (Rayleigh) con y sin los diferentes mecanismos de coordinación.

LOG-NORMAL	PROMEDIO DE CCI	MODA	DESVIACION ESTANDAR
Interferencia Total	- 11.97 dBm	- 12 dBm	9.02 dB
Control de Potencia Discreto 3 dB	-14.24 dBm	- 13 dBm	10.27 dB
Control de Potencia Discreto 6 dB	- 17.72 dBm	- 17 dBm	10.44 dB
Control Ideal de Potencia	- 17.84 dBm	- 19 dBm	11.2 dB
Regiones de Exclusión Dinámica	- 21.34 dBm	- 19 dBm	2.87 dB
Regiones de Exclusión Dinámica + Control Ideal de Potencia	- 26.18 dBm	\leq - 24 dBm	2.85 dB

Tabla 3.1 Promedio de CCI y moda en el escenario 1 con 100 femtoceldas (Log-Normal).



RAYLEIGH	PROMEDIO DE CCI	MODA	DESVIACION ESTANDAR
Interferencia Total	- 14.32 dBm	- 13 dBm	9.2 dB
Control de Potencia Discreto 3 dB	- 16.03 dBm	- 13 dBm	10.77 dB
Control de Potencia Discreto 6 dB	- 18.50 dBm	- 19 dBm	10.94 dB
Control Ideal de Potencia	- 20.16 dBm	- \leq 24 dBm	11.7 dB
Regiones de Exclusión Dinámica	- 20.76 dBm	- 19 dBm	6.21 dB
Regiones de Exclusión Dinámica + Control Ideal de Potencia	- 25.75 dBm	\leq - 24 dBm	9.64 dB

Tabla 3.2 Promedio de CCI y moda en el escenario 1 con 100 femtoceldas (Rayleigh).

Analizando las figuras 3.2 (a) a la 3.2 (f) y de la 3.3 (a) a la 3.3 (f), se aprecia que a medida que las femtoceldas emplean los diferentes mecanismos de coordinación, las barras con mayor número de repeticiones (moda), se desplazan hacia la izquierda, evidenciando la reducción cada vez mayor de la interferencia co-canal (CCI) percibida por el macro-usuario (MU), ya sea por la disminución de la energía radiada por las femtoceldas o por el cambio en frecuencia de operación. Por ejemplo, se observa como en el escenario donde no existe coordinación (interferencia total) el macro-usuario (MU) percibe mayor interferencia, representando la moda en el escenario con desvanecimiento lento, la barra representada con -12 dBm (rango entre -12.5 dBm y -11.5 dBm) y en el escenario con desvanecimiento rápido, la barra representada con -13 dBm (rango entre -13.5 dBm y -12.5 dBm); mientras que, en el escenario coordinado utilizando control de potencia discreto de 6 dB la interferencia percibida por el macro-usuario (MU) disminuye, resultando la moda tanto en el escenario con desvanecimiento lento como en el escenario con desvanecimiento rápido, la barra representada con -19 dBm (rango entre -19.5 dBm y -18.5 dBm); y en el escenario coordinado utilizando regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia el macro-usuario (MU) percibe un mínimo nivel de interferencia menor a -24 dBm, resultando la moda tanto en el escenario con desvanecimiento lento como en el escenario con desvanecimiento rápido, la barra representada con < -24 dBm.



De la misma forma a partir de las tablas 3.1 y 3.2, se aprecia como el promedio de CCI percibida por el macro-usuario (MU) disminuye considerablemente desde -11.97 dBm obtenido en el escenario con desvanecimiento lento y sin coordinación (interferencia total), hasta niveles de potencia de -17.8 dBm obtenido en el escenario coordinado utilizando control ideal de potencia (CP) y control de potencia discreto de 6 dB (CP 6 dB); y niveles de potencia inferiores a -26.18 dBm en el escenario coordinado utilizando regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia.

También se puede observar que las barras con mayor número de repeticiones obtenidas para el escenario coordinado, modelado con desvanecimiento rápido se dispersan más que las obtenidas en el escenario coordinado, modelado con desvanecimiento lento, ya que en el escenario con desvanecimiento rápido, la señal presenta mayor atenuación y en ciertos casos desvanecimientos profundos. Por ejemplo, en el escenario coordinado y desvanecimiento lento con regiones de exclusión dinámica, la totalidad de repeticiones se distribuyen en cuatro barras con una desviación estándar de 2.87 dB y con regiones de exclusión dinámica con control ideal de potencia, la totalidad de repeticiones se distribuyen en tres barras con una desviación estándar de 2.85 dB; mientras que para el escenario modelado con desvanecimiento rápido, el número de repeticiones se distribuyen en seis barras con desviación estándar de 6.21 dB; y en ocho barras con desviación estándar de 9.63 dB respectivamente. De la misma forma, la moda para el escenario coordinado con control ideal de potencia y modelado con desvanecimiento lento está representada con la barra de -19 dBm; mientras que en el escenario modelado con desvanecimiento rápido la moda está representada con la barra de < -24 dBm. Además, se observa como a medida en que se emplean los diferentes mecanismos de coordinación, la interferencia disminuye y se concentra en determinados rangos, disminuyendo en el mismo orden la desviación estándar.

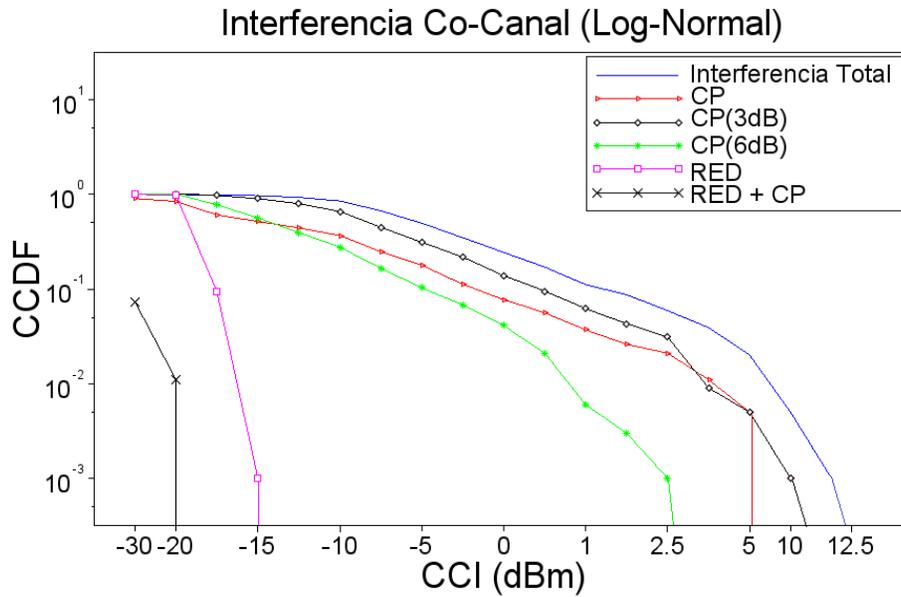


Figura 3.4 (a) Función de distribución acumulativa complementaria de la interferencia co-canal percibida por el macro-usuario (MU) con desvanecimiento lento.

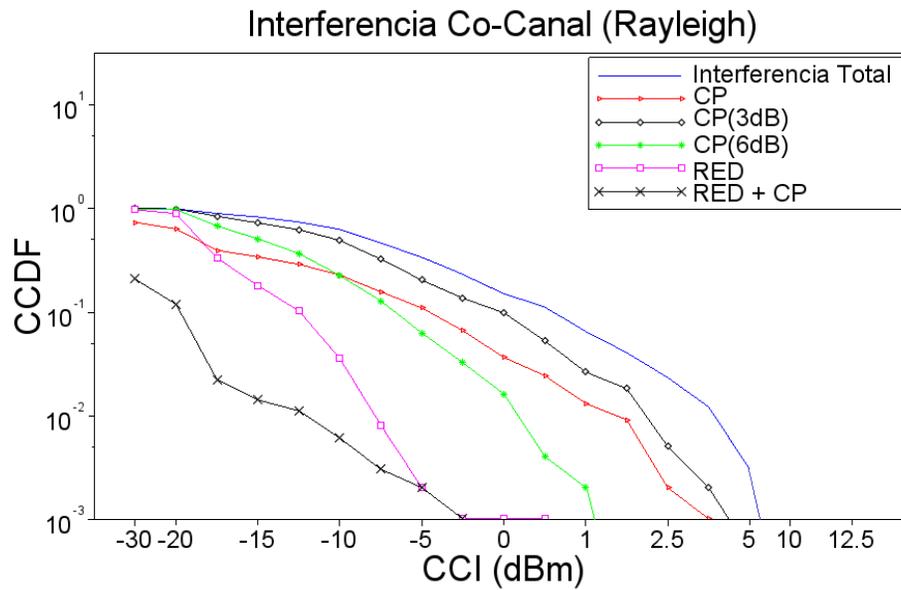


Figura 3.4 (b) Función de distribución acumulativa complementaria de la interferencia co-canal percibida por el macro-usuario (MU) con desvanecimiento rápido.



Las figuras 3.4 (a) y 3.4 (b) presentan por medio de la función de distribución acumulativa complementaria (CCDF) la probabilidad de que la interferencia co-canal (CCI) presente en el sistema percibida por el macro-usuario (MU) sea mayor o igual a cierto valor específico, en el escenario con 100 femtoceldas desplegadas, teniendo en cuenta tanto el desvanecimiento lento (Log-Normal) como el desvanecimiento rápido (Rayleigh), observando el comportamiento de la CCI en el escenario con y sin coordinación, donde dependiendo del mecanismo de coordinación utilizado, la CCI percibida por el macro-usuario (MU) se ve afectada. Inicialmente se caracterizó la CCI en el escenario sin coordinación representado con la línea azul (interferencia total), en donde no se hizo uso de ningún mecanismo de coordinación de interferencia y por lo tanto el MU percibe los niveles más altos de CCI, hasta una potencia de 12.5 dBm con desvanecimiento lento y 6.5 dBm con desvanecimiento rápido; luego se caracterizó la CCI en el escenario coordinado, implementando cada uno de los diferentes mecanismos de coordinación representados por: la línea negra con rombos (CP 3 dB), seguida por la línea roja con triángulos (CP), la línea verde con asteriscos (CP 6 dB), la línea violeta con cuadrados (RED) y por último la línea negra con cruces (RED + CP), los cuales lograron disminuir progresivamente la CCI percibida por el macro-usuario (MU) hasta en 14.5 dB aplicando regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia con desvanecimiento lento y hasta 11 dB en el escenario modelado con desvanecimiento rápido.

Analizando el comportamiento de las curvas violeta con cuadros (RED) y negra con cruces (RED + CP), se aprecia que en el escenario modelado con desvanecimiento lento las líneas logran una probabilidad de 10^{-3} en -20 dBm y -15 dBm respectivamente; mientras que modelado con desvanecimiento rápido, logran una probabilidad de 10^{-3} en -2.5 dBm y -2.5 dBm, resultando una diferencia de 17.5 dB y 12.5 dB de separación, evidenciando una mayor eficacia de estos dos últimos mecanismos (RED y RED + CP) en un escenario modelado con desvanecimiento lento o por sombra e indicando que el desvanecimiento rápido tiene asociado un mayor valor de atenuación.

Cabe resaltar que el control ideal de potencia representado por la línea roja con triángulos logra mitigar más la interferencia co-canal que el control de potencia discreto de 3 dB, representado por la línea negra con rombos, sin embargo, es superado por el control de potencia discreto de 6 dB representado por la línea verde con asteriscos.



La tabla 3.3 presenta los resultados más representativos de las figuras 3.4 (a) y 3.4 (b).

CCI (dBm)		CCDF					
		Interferencia Total	CP (3 dB)	CP	CP (6 dB)	RED	RED + CP
-10	Log-Normal	100 %	90 %	70 %	50 %	0 %	0 %
	Rayleigh	90 %	80 %	45 %	45 %	8 %	0.8 %
2.5	Log-Normal	9 %	7 %	5 %	0.2 %	0 %	0 %
	Rayleigh	7 %	0.8 %	0.3 %	0 %	0 %	0 %

Tabla 3.3 Función de distribución acumulativa complementaria vs interferencia co-canal.

La tabla 3.3 a partir de la función de distribución acumulativa complementaria, presenta la probabilidad de que la interferencia co-canal (CCI) presente en el sistema percibida por el macro-usuario (MU) sea mayor o igual a -10 dBm o 2.5 dBm teniendo en cuenta tanto el desvanecimiento lento como el desvanecimiento rápido. Por ejemplo, mientras que para el escenario sin coordinación (interferencia total) y desvanecimiento lento (Log-Normal), la probabilidad de que la interferencia co-canal (CCI) sea mayor o igual a -10 dBm es de 100 %, en el escenario coordinado, se observa como la probabilidad disminuye paulatinamente a medida que cada femtocelda emplea los diferentes mecanismos de coordinación de interferencia, comenzando con el mecanismo de control de potencia discreto de 3 dB, donde la probabilidad se disminuyó a 90%, luego utilizando control ideal de potencia donde la probabilidad se redujo a 70%, posteriormente utilizando control de potencia discreto (CP 6 dB) donde la probabilidad disminuyó a 50% y finalmente empleando regiones de exclusión dinámica (RED) y regiones de exclusión dinámica con control ideal de potencia (RED + CP) donde la probabilidad llegó a 0%, reduciendo claramente la interferencia y logrando que el nivel de potencia de CCI se mantenga siempre por debajo de -10 dBm.

Por otro lado la probabilidad de que la interferencia co-canal (CCI) sea mayor o igual a 2.5 dBm en el escenario coordinado aplicando cualquier mecanismo de coordinación con desvanecimiento lento (Log-Normal) siempre será menor a 7% y con desvanecimiento rápido a 0.8%, lo cual permite deducir que la interferencia casi nunca estará por encima de este valor.

Cabe resaltar que para el escenario coordinado modelado con desvanecimiento rápido (Rayleigh), la probabilidad de que la CCI sea mayor o igual a -10 dBm haciendo uso de regiones de exclusión dinámica (RED) y regiones de exclusión dinámica con control ideal de potencia (RED + CP) es diferente de cero, resultando 7% y 0.8% respectivamente, logrando mitigar ampliamente la CCI, pero no tanto como en el escenario modelado con desvanecimiento lento, donde la probabilidad es de 0%.

3.1.2 Cuatrocientas Femtoceldas Desplegadas.

En el presente escenario se despliegan 400 femtoceldas, representadas en la primera región de coordinación con color rojo y en la segunda región de coordinación con color blanco, donde el macro-usuario (MU) es el círculo de color azul, tal como se indica en la figura 3.5.

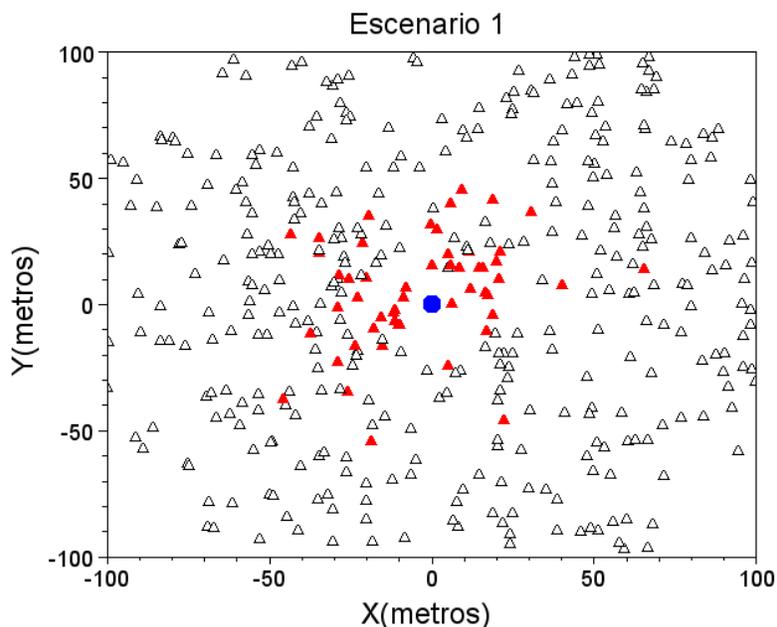
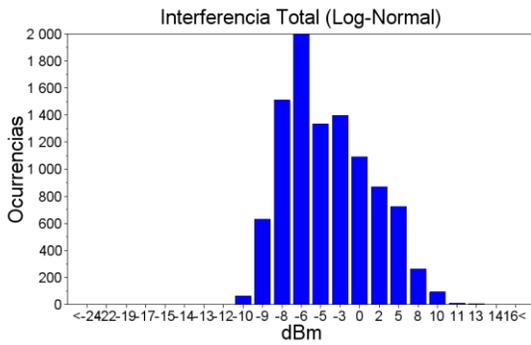


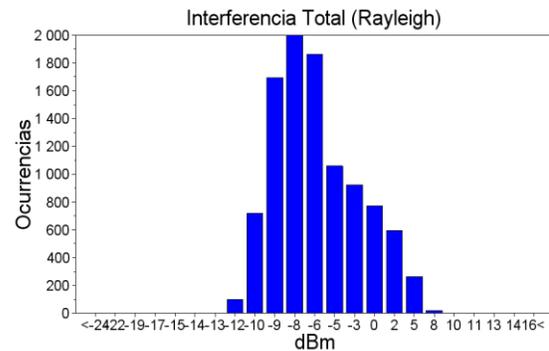
Figura 3.5 Escenario 1 con 400 femtoceldas.



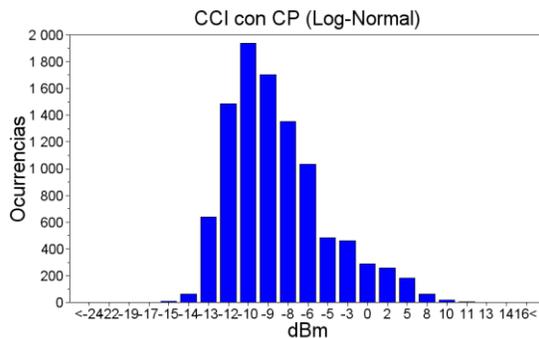
Las figuras 3.6 (a) a la 3.6 (f) y 3.7 (a) a la 3.7 (f) presentan por medio de histogramas, tras simular 10,000 veces el escenario 1 con 400 femtoceldas, el número de veces que la potencia de la interferencia co-canal (CCI) presente en el sistema percibida por el macro-usuario (MU) se encuentra dentro de los rangos establecidos, teniendo en cuenta el desvanecimiento lento (Log-Normal) y desvanecimiento rápido (Rayleigh) con y sin los diferentes mecanismos de coordinación.



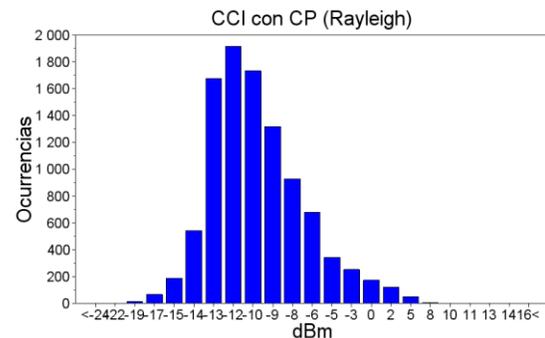
(a)



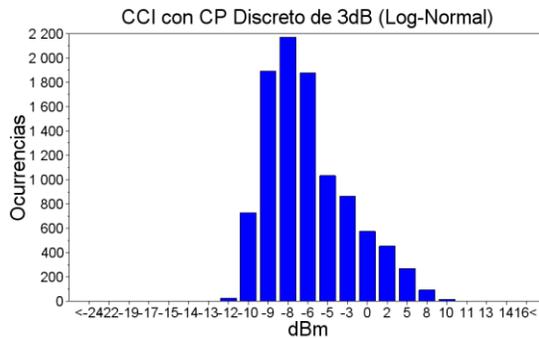
(a)



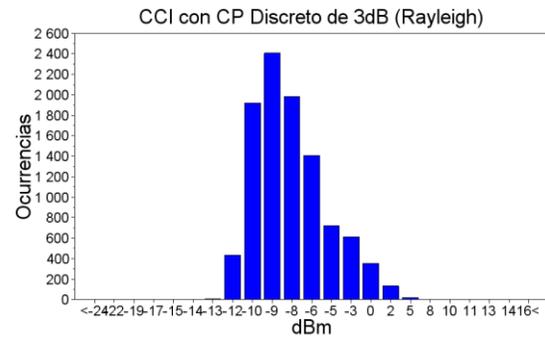
(b)



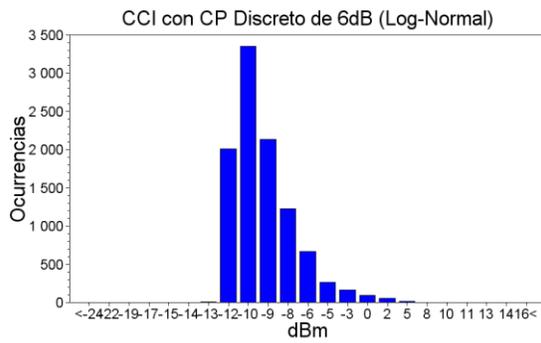
(b)



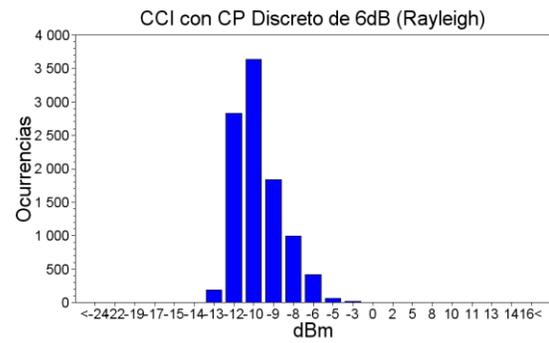
(c)



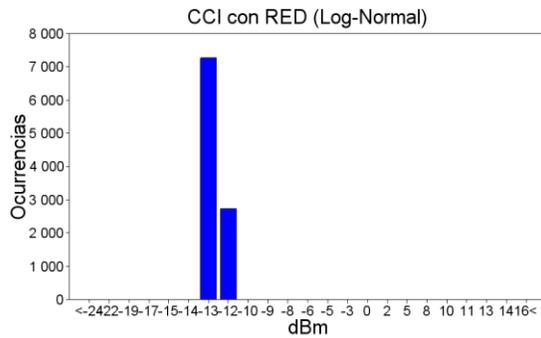
(c)



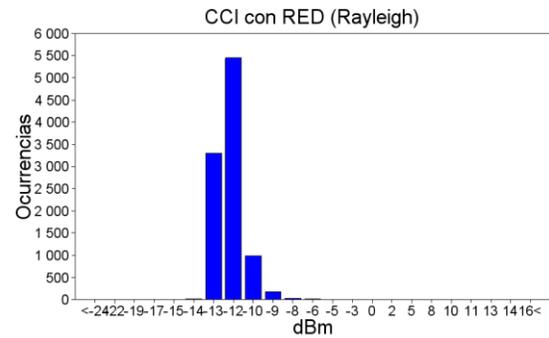
(d)



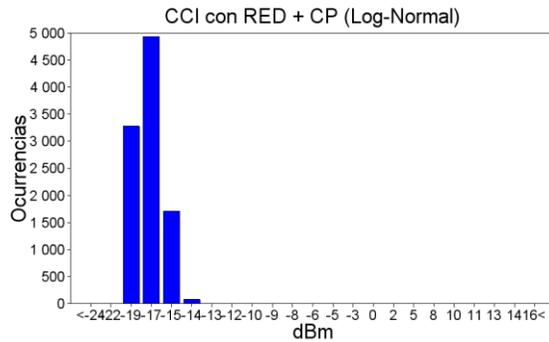
(d)



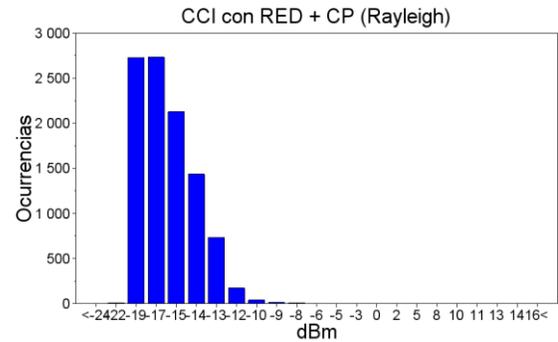
(e)



(e)



(f)



(f)

Figura 3.6 Histograma de CCI (Log-Normal).

Figura 3.7 Histograma de CCI (Rayleigh).

Las tablas 3.4 y 3.5 presentan el promedio de la interferencia co-canal percibida por el macro-usuario (MU) y la moda obtenida en el escenario con 400 femtoceldas, teniendo en cuenta el desvanecimiento lento (Log-Normal) y desvanecimiento rápido (Rayleigh), con y sin los diferentes mecanismos de coordinación.



LOG-NORMAL	PROMEDIO DE CCI	MODA	DESVIACION ESTANDAR
Interferencia Total	- 3.53 dBm	- 6 dBm	5.4 dB
Control de Potencia Discreto 3 dB	- 6.14 dBm	- 8 dBm	6.53 dB
Control de Potencia Discreto 6 dB	- 10.49 dBm	- 10 dBm	4.6 dB
Control Ideal de Potencia	- 9.15 dBm	- 10 dBm	7.67 dB
Regiones de Exclusión Dinámica	- 15.25 dBm	- 13 dBm	2.79 dB
Regiones de Exclusión Dinámica + Control Ideal de Potencia	- 19.87 dBm	- 17 dBm	4.09 dB

Tabla 3.4 Promedio de CCI y moda en el escenario 1 con 400 femtoceldas (Log-Normal).

RAYLEIGH	PROMEDIO DE CCI	MODA	DESVIACION ESTANDAR
Interferencia Total	- 6.00 dBm	- 8 dBm	5.6 dB
Control de Potencia Discreto 3 dB	- 8.22 dBm	- 9 dBm	7.03 dB
Control de Potencia Discreto 6 dB	- 11.54 dBm	- 10 dBm	5.1 dB
Control Ideal de Potencia	- 11.58 dBm	- 12 dBm	8.17 dB
Regiones de Exclusión Dinámica	- 14.35 dBm	- 12 dBm	4.85 dB
Regiones de Exclusión Dinámica + Control Ideal de Potencia	- 19.13 dBm	- 19 dBm	6.34 dB

Tabla 3.5 Promedio de CCI y moda en el escenario 1 con 400 femtoceldas (Rayleigh).



Comparando las figuras 3.6 (a) a la 3.6 (f) y de la 3.7 (a) a la 3.7 (f), se aprecia un corrimiento de las barras con mayor número de repeticiones y la moda hacia la derecha en comparación con los histogramas de las figuras 3.2 y 3.3 (escenario con 100 femtoceldas), indicando un incremento de la interferencia en el sistema percibido por el MU. Por ejemplo, se observa como en el escenario sin coordinación (interferencia total) con 100 femtoceldas desplegadas en el escenario con desvanecimiento lento, la moda paso de ser la barra representada por -12 dBm (rango entre -12.5 dBm y -11.5 dBm) a la barra representada por -6 dBm (rango entre -6.5 dBm y -5.5 dBm) en el escenario con 400 femtoceldas, y en el escenario con desvanecimiento rápido, paso de ser la barra representada por -13 dBm a la barra representada por -8 dBm. Aumentando en 6 dB la interferencia co-canal percibida por el macro-usuario (MU) en el escenario con desvanecimiento lento y 5 dB en el escenario con desvanecimiento rápido.

De igual manera, comparando los diferentes promedios de interferencia co-canal (CCI) y moda de las tablas 3.1 y 3.4, para el caso del escenario sin coordinación (interferencia total) con 100 femtoceldas y desvanecimiento lento (Log-Normal), el promedio de CCI fue de -11.97 dBm y la moda de -12 dBm, mientras que para el escenario con 400 femtoceldas e igual situación, el promedio de CCI fue de -3.53 dBm y la moda de -6 dBm, incrementando en aproximadamente 9 dB el nivel de CCI percibido por el macro-usuario (MU).

Por otro lado las tablas 3.4 y 3.5 permiten comprobar como la aplicación de cada mecanismo de coordinación ayuda a reducir considerablemente la interferencia, pasando de -3.53 dBm de promedio de CCI en el escenario sin coordinación (interferencia total) a -19.87 dBm aproximadamente en el escenario coordinado con regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia, disminuyendo en 16.34 dB la interferencia co-canal, 2 dB más que en el escenario con 100 femtoceldas.

En conclusión, al incrementar de 100 a 400 el número de femtoceldas desplegadas en el escenario 1, cuando cada una de las femtoceldas aplica cualquier mecanismo de coordinación, el macro-usuario (MU) percibe en el peor de los casos (control de potencia discreto 3 dB) un promedio de CCI de -6.14 dBm y existe un 20% de probabilidad de que la interferencia co-canal (CCI) percibida sea mayor o igual a 2.5 dBm, logrando mitigar la CCI percibida por el macro-usuario (MU). De igual forma, se observa cómo las barras con mayor número de repeticiones obtenidas para el escenario coordinado, modelado con desvanecimiento rápido se dispersan más que las obtenidas en el escenario coordinado, modelado con desvanecimiento lento, ya que en el escenario con desvanecimiento rápido, la señal presenta mayor atenuación y en ciertos casos desvanecimientos profundos. Por ejemplo, en el escenario coordinado y desvanecimiento lento con regiones de exclusión dinámica, la desviación estándar de la interferencia es de 2.79 dB y con regiones de



exclusión dinámica con control ideal de potencia, de 4.09 dB; mientras que para el escenario modelado con desvanecimiento rápido, la desviación estándar es de 4.85 dB y de 6.34 dB respectivamente.

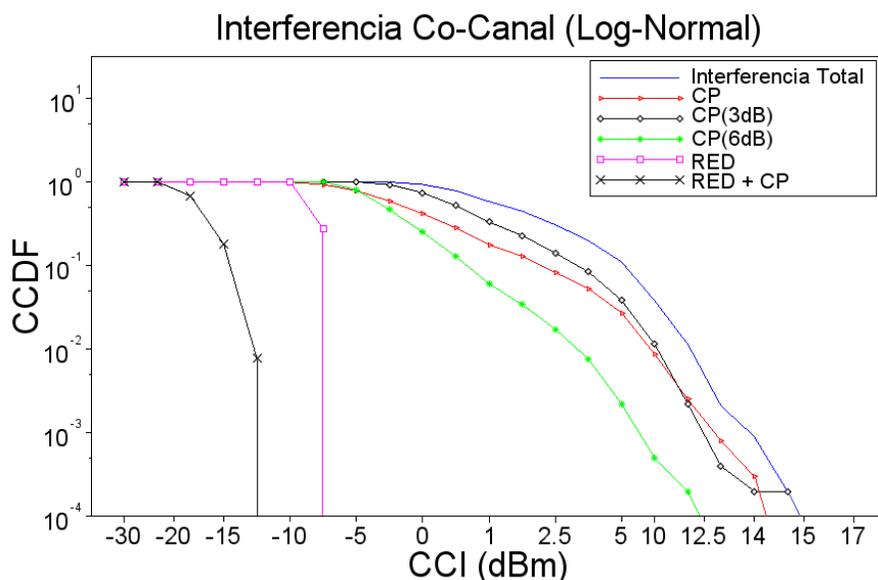


Figura 3.8 (a) Función de distribución acumulativa complementaria de la interferencia co-canal percibida por el macro-usuario (MU) con desvanecimiento lento.

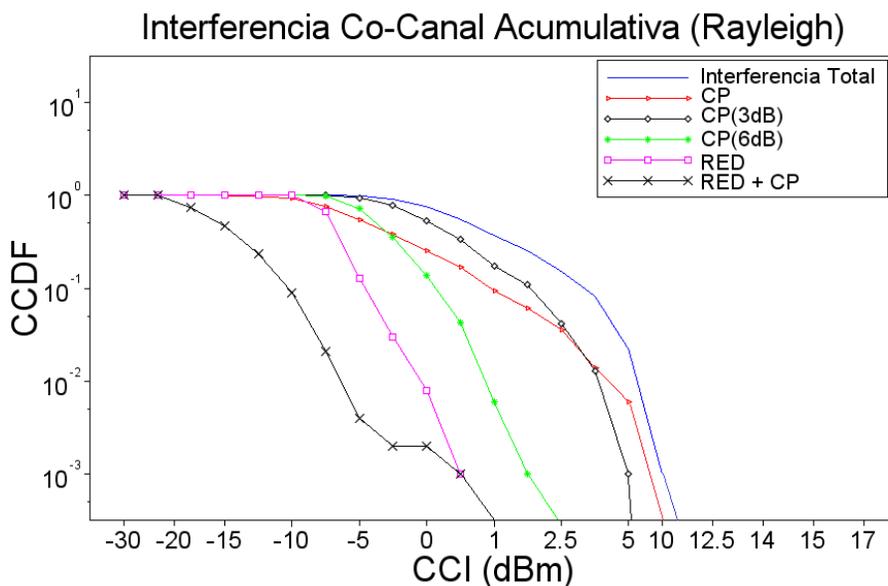


Figura 3.8 (b) Función de distribución acumulativa complementaria de la interferencia co-canal percibida por el macro-usuario (MU) con desvanecimiento rápido.



Las figuras 3.8 (a) y 3.8 (b) presentan por medio de la función de distribución acumulativa complementaria (CCDF) la probabilidad de que la interferencia co-canal (CCI) presente en el sistema percibida por el macro-usuario (MU) sea mayor o igual a cierto valor específico, en el escenario con 400 femtoceldas desplegadas, con y sin coordinación, observando un comportamiento similar que en las figuras 3.4 (a) y 3.4 (b) obtenidas con 100 femtoceldas desplegadas, con la diferencia de que el nivel de interferencia co-canal (CCI) presente en el sistema aumentó 3 dB aproximadamente con desvanecimiento lento, incrementando la CCI hasta un valor máximo de 15 dBm en el escenario sin coordinación (interferencia total), -7.5 dBm empleando región de exclusión dinámica y hasta -13 dBm empleando región de exclusión dinámica más control ideal de potencia.

Por otra parte, el escenario modelado con desvanecimiento rápido (Rayleigh) presenta un mayor valor de desvanecimiento o atenuación (menor contribución de CCI) utilizando mecanismos de coordinación de interferencia relacionados con potencia (CP, CP 3 dB, CP 6 dB), ya que el máximo valor de interferencia co-canal obtenido por estos mecanismos es de 10 dBm (CP), mientras que en el escenario modelado con desvanecimiento lento (Log Normal) alcanzan un valor de interferencia de 14 dBm (CP) y 14.5 dBm (CP 3 dB) igualando al escenario sin coordinación (interferencia total).

La tabla 3.6 presenta los resultados más representativos de las figuras 3.8 (a) y 3.8 (b).

CCI (dBm)		PROBABILIDAD DE DEGRADACION (CCDF)											
		Interferencia Total		CP(3 dB)		CP		CP (6 dB)		RED		RED + CP	
		100	400	100	400	100	400	100	400	100	400	100	400
-10	Log-Normal	100%	100%	90%	100%	70%	100%	50%	100%	0%	100%	0%	0%
	Rayleigh	90%	100%	80%	100%	45%	100%	45%	100%	8%	99%	0.8%	9%
2.5	Log-Normal	9%	65%	7%	20%	5 %	9%	0.2%	3%	0%	0%	0%	0%
	Rayleigh	7%	25%	0.8 %	8%	0.3%	6%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabla 3.6 Función de distribución acumulativa complementaria vs interferencia co-canal.



La tabla 3.6 a partir de la función de distribución acumulativa complementaria, presenta y compara la probabilidad de que la interferencia co-canal (CCI) percibida por el macro-usuario (MU) sea mayor o igual a -10 dBm o 2.5 dBm, en el escenario 1 con 100 y 400 femtoceldas desplegadas, teniendo en cuenta tanto el desvanecimiento lento como el desvanecimiento rápido. En ese sentido, el único caso en el escenario con 100 femtoceldas que presentó el 100% de probabilidad de que la interferencia co-canal este por encima de -10 dBm, es en el escenario sin coordinación (interferencia total) y desvanecimiento lento (Log-Normal); mientras que, en el escenario con 400 femtoceldas, la probabilidad es de 100% utilizando cualquier mecanismo de coordinación, exceptuando el mecanismo de regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia con 0% el cual logra mitigar considerablemente la CCI. Permitiendo concluir que se obtuvo un incremento importante de interferencia co-canal (CCI) en el sistema, el cual es solo controlado formidablemente por el mecanismo de regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia.

Sin embargo, luego de incrementar de 100 a 400 el número de femtoceldas desplegadas en el escenario, la probabilidad de que la interferencia co-canal (CCI) percibida por el macro-usuario (MU) sea mayor o igual a 2.5 dBm se mantuvo por debajo del 20% con desvanecimiento lento y 8% con desvanecimiento rápido en todos los escenarios donde se implementó algún mecanismo de coordinación, logrando una probabilidad de 0% utilizando control de potencia discreto de 6 dB y regiones de coordinación con y sin control de potencia, cumpliendo su función de mitigación de CCI.

3.2 ESCENARIOS 2 y 3.

En estos dos escenarios, por medio de la relación señal a interferencia (SIR) se obtuvo la probabilidad de degradación del servicio (*Outage Probability*) brindado por la macro estación base al macro-usuario (MU) en función de la distancia entre la macro estación base y el MU (r_0) y la densidad de femtoceldas en el escenario (λ), donde la presencia de femtoceldas que operan en la misma banda de frecuencia que la macro estación base con método de acceso cerrado, afectan y disminuyen progresivamente la SIR percibida por el MU, hasta obtener una SIR por debajo de la SIR objetivo (0 dB), degradando o interrumpiendo el servicio.

Por otro lado cuando el valor de SIR aumenta considerablemente hasta superar el SIR objetivo establecido, la macro estación base proporciona al macro-usuario (MU) el servicio con calidad.

3.2.1 Escenario 2.

3.2.1.1 Cien femtoceldas desplegadas.

En el presente escenario, se despliegan 100 femtoceldas, representadas en la primera región de coordinación con color rojo y en la segunda región de coordinación con color blanco, luego la macro estación base de color verde a diferentes distancias (r_o) del macro-usuario (MU), desde 5 m hasta 25 m, y por último el macro-usuario (MU) representado por un círculo de color azul, tal como se indica en la figura 3.9.

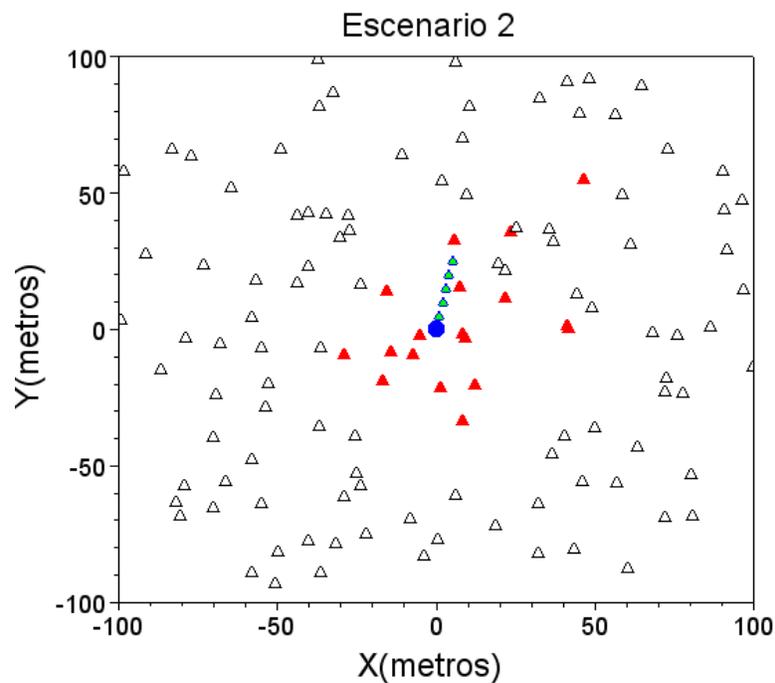


Figura 3.9 Escenario 2 con 100 femtoceldas.



➤ Análisis con desvanecimiento lento (Log Normal)

LOG-NORMAL	Moda de la SIR				
	$r_o = 5\text{ m}$	$r_o = 10\text{ m}$	$r_o = 15\text{ m}$	$r_o = 20\text{ m}$	$r_o = 25\text{ m}$
Interferencia Total	> 7 dB	3 dB - 7 dB	0 dB - 3 dB	< -5 dB	< -5 dB
Control de Potencia Discreto 6 dB	> 7 dB	> 7 dB	3 dB - 7 dB	0 dB - 3 dB	< -5 dB
Regiones de Exclusión Dinámica + Control Ideal de Potencia	> 7 dB	> 7 dB	> 7 dB	3 dB - 7 dB	0 dB - 3 dB

Tabla 3.7 Moda de la SIR con desvanecimiento lento.

Con el objetivo de evaluar la calidad de servicio brindado al macro-usuario, alejado de la macro estación base a diferentes distancias, se obtuvo la tabla 3.7 (para mayor detalle remitirse al apéndice 1), donde se aprecia que a medida que las femtoceldas emplean los diferentes mecanismos de coordinación, las barras con mayor número de repeticiones (moda), se desplazan hacia la derecha, demostrando un incremento cada vez mayor de la SIR en el macro-usuario (MU), ya sea por la disminución de la energía radiada por las femtoceldas o por el cambio en frecuencia de operación. Por ejemplo, se observa como en el escenario donde no existe coordinación (interferencia total), la SIR en el macro-usuario (MU) pasa de valores por encima de 7 dB a una distancia de 5 m, a valores entre 3 dB y 7 dB cuando el MU se aleja a una distancia de 10 m de la macro estación base y cae a valores por debajo de -5 dB a una distancia de 17 m; mientras que en el escenario coordinado haciendo uso de regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia, la SIR en el macro-usuario (MU) se mantiene por encima de 7 dB hasta una distancia entre el macro-usuario (MU) y la macro estación base de 17 m y se mantiene por encima de 0 dB hasta una distancia de 25 m, logrando reducir la CCI e incrementar la SIR considerablemente.

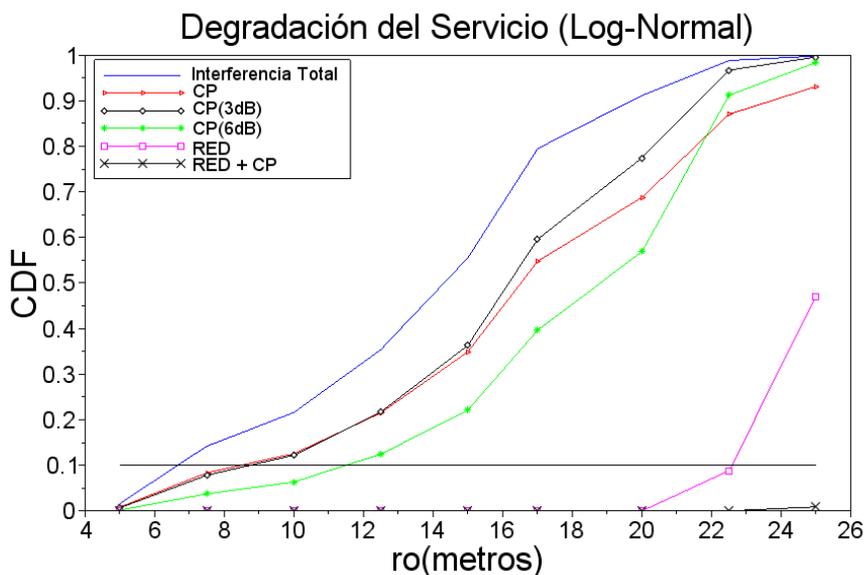


Figura 3.10 Función de distribución acumulativa en el escenario 2 con 100 femtoceldas y SIR objetivo de 0 dB con desvanecimiento lento.

LOG-NORMAL	SIR PROMEDIO				
	$r_o = 5 \text{ m}$	$r_o = 10 \text{ m}$	$r_o = 15 \text{ m}$	$r_o = 20 \text{ m}$	$r_o = 25 \text{ m}$
Interferencia Total	14.66 dB	3.69 dB	-1.81 dB	-6.02 dB	- 9.35 Db
Control de Potencia Discreto 3 dB	16.92 dB	5.95 dB	0.44 dB	-3.76 dB	- 7.08 dB
Control de Potencia Discreto 6 dB	18.85 dB	7.88 dB	2.37 dB	-1.82 dB	- 5.15 dB
Control Ideal de Potencia	17.44 dB	6.43 dB	0.97 dB	-3.24 dB	- 6.58 dB
Regiones de Exclusión Dinámica	24.05 dB	13.05 dB	7.56 dB	3.37 dB	0.08 dB
Regiones de Exclusión Dinámica + Control Ideal de Potencia	26.30 dB	15.30 dB	9.81 dB	5.61 dB	2.33 dB

Tabla 3.8 SIR promedio en el escenario 2 con 100 femtoceldas (Log-Normal).



La figura 3.10 presenta como a medida que el macro-usuario (MU) se aleja de la macro estación base, el nivel de relación señal a interferencia (SIR) disminuye hasta alcanzar niveles por debajo de la SIR objetivo (0 dB), aumentando la probabilidad de degradación del servicio y por lo tanto la interrupción del servicio. Por ejemplo, cuando el MU se desplaza a una distancia igual a 5 m de la macro estación base, la probabilidad de degradación del servicio brindado al MU es menor a 5% tanto en el escenario sin coordinación como para los escenarios empleando los diferentes mecanismos de coordinación, sin embargo, cuando el MU se desplaza a una distancia igual a 25 m de la macro estación base, en el escenario sin coordinación (interferencia total) y con coordinación, aplicando control ideal de potencia (CP) y control de potencia discreto (CP 3 dB o CP 6 dB), la probabilidad de degradación del servicio brindado al MU aumentó por encima del 88% y de acuerdo a la tabla 3.8, el promedio de relación señal a interferencia (SIR) percibida por el macro-usuario (MU) es menor que la SIR objetivo, llegando hasta -9.35 dB en el escenario sin coordinación (interferencia total). Por otro lado, en el escenario coordinado aplicando regiones de exclusión dinámica, la probabilidad de degradación del servicio más alta es de 47%, y aplicando regiones de exclusión dinámica con control ideal de potencia, la probabilidad de degradación del servicio es igual 0%, obteniendo la relación señal a interferencia (SIR) siempre por encima del valor de la SIR objetivo, logrando mitigar formidablemente la CCI y permitiendo a la macro estación base ofrecer un servicio de calidad sin importar cuantos metros se encuentre desplazado el MU de la macro estación base.

De la misma forma, se puede observar el efecto de los mecanismos de coordinación, donde cada femtocelda ubicada en la primera región de coordinación aplicando control de potencia discreto de 6 dB y el MU desplazado a una distancia igual a 15 m de la macro estación base, la probabilidad de degradación del servicio se reduce en 37% comparada con el escenario sin coordinación (interferencia total). Asimismo, aplicando regiones de exclusión dinámica (RED) con y sin control ideal de potencia con el MU desplazado a una distancia igual a 25 m de la macro estación base, la probabilidad de degradación del servicio se reduce en 53% y 100% respectivamente, comparado con el escenario sin coordinación (interferencia total); y en 46% y 93%, comparado con el escenario coordinado aplicando control ideal de potencia.



Probabilidad de Degradación	r_0 (m) Log-Normal					
	Interferencia Total	CP 3 dB	CP	CP 6 dB	RED	RED + CP
10%	6.5	8.5	8.5	11.5	22.5	> 25

Tabla 3.9 Distancia entre la macro estación base y macro usuario con 10% probabilidad de degradación.

Para evaluar la calidad del servicio brindado al macro-usuario (MU), se observa en cada escenario la distancia máxima que puede estar alejado el macro usuario (MU) de la macro estación base (r_0) para mantener la probabilidad de degradación de servicio por debajo de 10%. De esta manera, de la tabla 3.9 se concluye que para mantener la probabilidad de degradación debajo de ese valor, el MU solo podrá estar a una distancia máxima de 6.5 m de la macro estación base en el escenario sin coordinación (interferencia total), una distancia máxima de 8.5 m en el escenario coordinado con control ideal de potencia y discreto de 3 dB, 11.5 m en el escenario coordinado con control de potencia discreto de 6 dB, 22.5 m con regiones de exclusión dinámica y por último, a una distancia mayor a 25 m aplicando regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia, ya que para una distancia de 25 m la probabilidad es de 0%. Observando como la utilización de cada mecanismo de coordinación permite reducir la interferencia CCI, permitiendo al MU alejarse de la macro estación base cada vez más sin incrementar la probabilidad de degradación, manteniéndola por debajo de 10%.



➤ Análisis con desvanecimiento rápido (Rayleigh)

RAYLEIGH	Moda de la SIR				
	$r_o = 5\text{ m}$	$r_o = 10\text{ m}$	$r_o = 15\text{ m}$	$r_o = 20\text{ m}$	$r_o = 25\text{ m}$
Interferencia Total	> 7 dB	> 7 dB	0 dB - 3 dB	< -5 dB	< -5 dB
Control de Potencia Discreto 6 dB	> 7 dB	> 7 dB	3 dB - 7 dB	0 dB - 3 dB	< -5 dB
Regiones de Exclusión Dinámica + Control Ideal de Potencia	> 7 dB	> 7 dB	> 7 dB	3 dB - 7 dB	0 dB - 3 dB

Tabla 3.10 Moda de la SIR con desvanecimiento rápido.

Con el objetivo de evaluar la calidad de servicio brindado al macro-usuario, alejado de la macro estación base a diferentes distancias, se obtuvo la tabla 3.10 (para mayor detalle remitirse al apéndice 2), donde se aprecia que a medida que las femtoceldas emplean los diferentes mecanismos de coordinación, las barras con mayor número de repeticiones (moda), se desplazan hacia la derecha, demostrando un incremento cada vez mayor de la SIR en el macro-usuario (MU). Comparando el comportamiento entre los escenarios con desvanecimiento lento y rápido, se puede observar que en general debido al desvanecimiento rápido la SIR presenta un incremento general, un ejemplo de esto se presenta en el escenario sin coordinación (interferencia total) a una distancia r_o igual a 10 m, donde el valor de la moda paso de 0 dB a 3 dB con desvanecimiento lento, a valores por encima de 7 dB con desvanecimiento rápido.

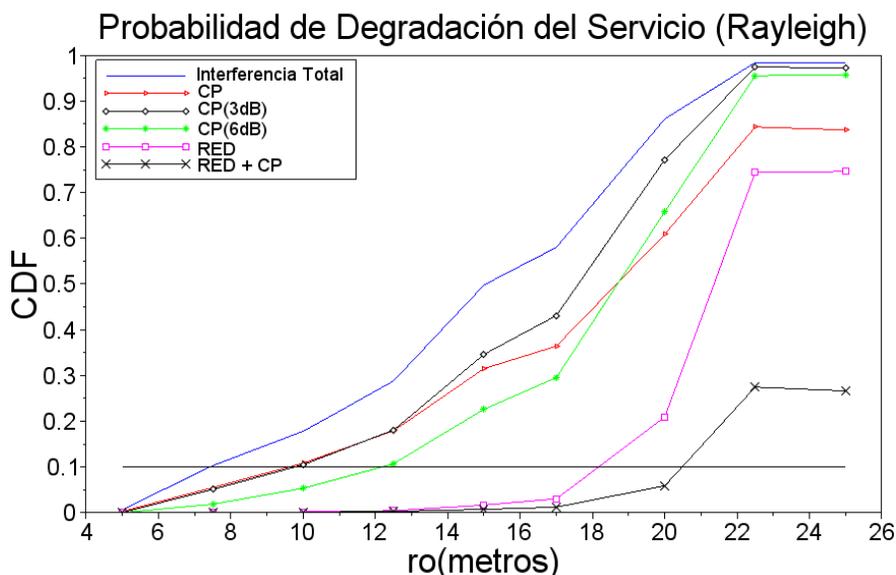


Figura 3.11 Función de distribución acumulativa en el escenario 2 con 100 femtoceldas y SIR objetivo de 0 dB con desvanecimiento rápido.

RAYLEIGH	SIR PROMEDIO				
	$r_o = 5\text{ m}$	$r_o = 10\text{ m}$	$r_o = 15\text{ m}$	$r_o = 20\text{ m}$	$r_o = 25\text{ m}$
Interferencia Total	15.47 dB	4.79 dB	-1.06 dB	- 5.14 dB	-7.82 dB
Control de Potencia Discreto 3 dB	17.19 dB	6.50 dB	0.65 dB	- 3.42 dB	-6.10 dB
Control de Potencia Discreto 6 dB	18.58 dB	7.88 dB	2.04 dB	- 2.02 dB	-4.07 dB
Control Ideal de Potencia	18.22 dB	7.49 dB	1.63 dB	- 2.38 dB	-5.09 dB
Regiones de Exclusión Dinámica	21.89 dB	11.21 dB	5.35 dB	1.33 dB	-1.33 dB
Regiones de Exclusión Dinámica + Control Ideal de Potencia	24.26 dB	13.56 dB	7.74 dB	3.67 dB	1.01 dB

Tabla 3.11 SIR promedio en el escenario 2 con 100 femtoceldas (Rayleigh).



Debido a que en el escenario modelado con desvanecimiento rápido (Rayleigh), las señales interferentes emitidas por cada una de las femtoceldas presentan mayor atenuación y en ciertos momentos desvanecimientos profundos, el macro-usuario (MU) percibe una menor interferencia proveniente de las femtoceldas desplegadas en el escenario modelado con desvanecimiento lento (Log-Normal), por lo tanto, la figura 3.11 que representa el escenario modelado con desvanecimiento rápido (Rayleigh), presenta un comportamiento especial, donde en ocasiones, los tres primeros mecanismos relacionados con gestión de potencia (líneas negra con círculos, roja con triángulos y verde con asteriscos) presentan menor probabilidad de degradación en comparación con el escenario modelado con desvanecimiento lento (Log-Normal) y por otro lado, los dos últimos mecanismos relacionados con gestión de espectro (líneas violeta con cuadros y negra con cruces) presentan mayor probabilidad de degradación. Por ejemplo, en una distancia entre la macro estación base y el macro-usuario (MU) igual a 20 m, los mecanismos relacionados con gestión de potencia presentan menos probabilidad de degradación con una diferencia de aproximadamente 9% (CP) y según la tabla 3.11 el SIR promedio percibida por el macro-usuario (MU) aumenta en aproximadamente 0.9 dB, y los mecanismos relacionados con gestión de espectro aumentó la probabilidad de degradación en aproximadamente 20% (RED) y 5% (RED + CP), y se reduce en aproximadamente 2 dB el promedio de la SIR percibida por el macro-usuario (MU).

Probabilidad de Degradación	r ₀ (m) Rayleigh					
	Interferencia Total	CP 3 dB	CP	CP 6 dB	RED	RED + CP
10%	7.5	10	10	12.5	18	20.5

Tabla 3.12 Distancia entre la macro estación base y macro usuario con 10% de probabilidad de degradación.

A partir de la tabla 3.12 se observa como la distancia entre la macro estación base y el macro-usuario (MU) a fin de mantener por debajo del 10% la probabilidad de degradación del servicio, disminuye hasta 18 m y 20.5 m haciendo uso de regiones de exclusión dinámica y regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia respectivamente, en comparación con el escenario modelado con desvanecimiento lento, donde las distancias son de 22.5 m y mayor a 25 m.

3.2.1.2 Cuatrocientas Femtoceldas desplegadas.

En el presente escenario, se despliegan 400 femtoceldas, representadas en la primera región de coordinación con color rojo y en la segunda región de coordinación con color blanco, luego la macro estación base de color verde a diferentes distancias (r_0) de la macro estación base, desde 5 m hasta 25 m, y por último el macro-usuario (MU) representado por un círculo de color azul, tal como se indica en la figura 3.12.

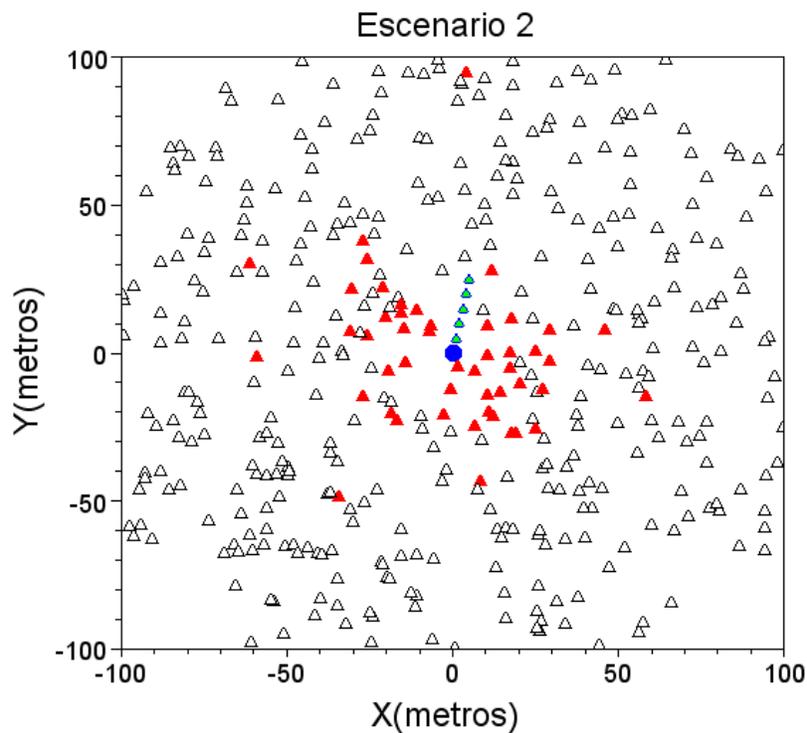


Figura 3.12 Escenario 2 con 400 femtoceldas.



➤ Análisis con desvanecimiento lento (Log Normal)

LOG NORMAL	Moda de la SIR				
	$r_o = 5 \text{ m}$	$r_o = 10 \text{ m}$	$r_o = 15 \text{ m}$	$r_o = 20 \text{ m}$	$r_o = 25 \text{ m}$
Interferencia Total	3 dB - 7 dB	< -5 dB	< -5 dB	< -5 dB	< -5 dB
Control De Potencia Discreto 6 dB	> 7 dB	0 dB - 3 dB	< -5 dB	< -5 dB	< -5 dB
Regiones De Exclusión Dinámica + Control Ideal De Potencia	> 7 dB	> 7 dB	0 dB - 3 dB	-5 dB - -3.5 dB	-5 dB y -3.5 dB

Tabla 3.13 Moda de la SIR con desvanecimiento lento.

Con el objetivo de evaluar la calidad de servicio brindado al macro-usuario, alejado de la macro estación base a diferentes distancias, se obtuvo la tabla 3.13 (para mayor detalle remitirse al apéndice 3), donde se aprecia como el valor de la SIR en el macro-usuario (MU) se afecta debido al aumento en el número de femtoceldas desplegadas, por ejemplo en el escenario sin coordinación (interferencia total) la SIR se encuentra por debajo de -5 dB a partir de una distancia entre el macro-usuario (MU) y la macro estación base de 10 m, a diferencia del escenario con 100 femtoceldas, donde la SIR toma valores negativos cuando el macro-usuario (MU) se aleja una distancia de 15 m de la macro estación base; 5 m más alejado. Por otro lado, en el escenario coordinado con región de exclusión dinámica más control ideal de potencia a pesar de incrementar 300 femtoceldas, permite que la SIR en el macro-usuario (MU) se mantenga por encima de 0 dB hasta una distancia de 17 m, logrando mitigar la CCI.

De igual forma, la tabla 3.13 permite comprobar como la aplicación de cada mecanismo de coordinación ayuda a reducir considerablemente la interferencia, pasando de -5 dB de SIR en el escenario sin coordinación (interferencia total) a 7 dB de SIR aproximadamente en el escenario coordinado con regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia.

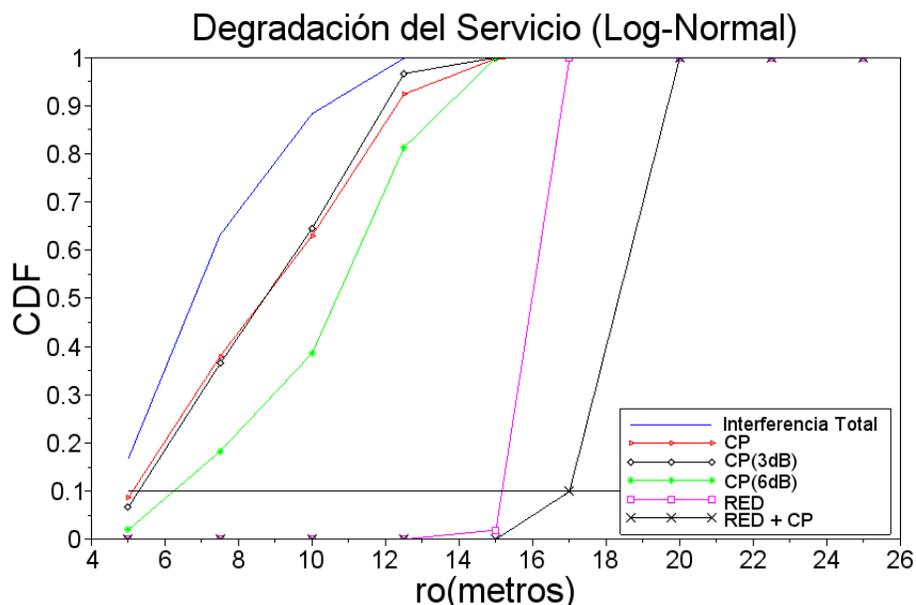


Figura 3.13 Función de distribución acumulativa en el escenario 2 con 100 femtoceldas y SIR objetivo de 0 dB con desvanecimiento lento.

LOG-NORMAL	SIR PROMEDIO				
	$r_o = 5 \text{ m}$	$r_o = 10 \text{ m}$	$r_o = 15 \text{ m}$	$r_o = 20 \text{ m}$	$r_o = 25 \text{ m}$
Interferencia Total	4.07 dB	- 4.66 dB	- 10.80 dB	- 16.39 dB	-16.54 dB
Control De Potencia Discreto 3 dB	6.68 dB	- 2.05 dB	- 8.19 dB	- 13.78 dB	- 13.92 dB
Control De Potencia Discreto 6 dB	9.02 dB	0.29 dB	- 5.84 dB	- 11.43 dB	- 11.57 dB
Control Ideal De Potencia	6.67 dB	- 2.06 dB	- 8.13 dB	- 13.74 dB	-13.93 dB
Regiones De Exclusión Dinámica	15.72 dB	7.04 dB	0.86 dB	- 4.71 dB	- 4.83 dB
Regiones De Exclusión Dinámica + Control Ideal De Potencia	17.93 dB	9.25 dB	3.06 dB	- 2.50 dB	- 2.62 dB

Tabla 3.14 SIR promedio en el escenario 2 con 400 femtoceldas (Log-Normal).



La tabla 3.14 presenta el promedio de la relación señal a interferencia (SIR) percibida por el MU en el escenario 2 con 400 femtoceldas desplegadas, modelado con desvanecimiento lento, donde por causa del aumento de 300 femtoceldas en el escenario, el promedio de la SIR percibida por el macro-usuario (MU) se redujo aproximadamente en 9 dB en comparación con el escenario 2 con 100 femtoceldas desplegadas, aumentando la probabilidad de degradación del servicio brindado al MU.

Probabilidad de Degradación	r_0 (m) Log-Normal					
	Interferencia Total	CP 3 dB	CP	CP 6 dB	RED	RED + CP
10%	< 5	5.2	5	6.2	15	17

Tabla 3.15 Distancia entre la macro estación base y macro usuario con probabilidad de degradación igual a 10%.

Con el objetivo de evaluar el efecto del despliegue de 400 femtoceldas en el escenario, a partir de la figura 3.13 se obtiene la tabla 3.15, la cual presenta la distancia máxima (r_0) a la cual puede estar el MU de la macro estación base para obtener una probabilidad de degradación menor a 10%. Por ejemplo, en el escenario sin coordinación (interferencia total) es imposible lograr tal probabilidad; en el escenario coordinado con control ideal de potencia y discreto de 3 dB se logra tal probabilidad a una distancia de 5 m; en el escenario coordinado con control de potencia discreto de 6 dB a una distancia de 6.2 m; con regiones de exclusión dinámica a una distancia de 15 m y por último, en regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia a una distancia de hasta 17 m. Observando que el macro-usuario (MU) para lograr una probabilidad de 10% con el aumento de 300 femtoceldas en el escenario tendría que acercarse más de 7 m, en comparación con el escenario con 100 femtoceldas.



➤ Análisis con desvanecimiento rápido (Rayleigh)

RAYLEIGH	Moda de la SIR				
	$r_o = 5 \text{ m}$	$r_o = 10 \text{ m}$	$r_o = 15 \text{ m}$	$r_o = 20 \text{ m}$	$r_o = 25 \text{ m}$
Interferencia Total	3 dB - 7 dB	< -5 dB	< -5 dB	< -5 dB	< -5 dB
Control De Potencia Discreto 6 dB	> 7 dB	0 dB - 3 dB	< -5 dB	< -5 dB	< -5 dB
Regiones De Exclusión Dinámica + Control Ideal De Potencia	> 7 dB	> 7 dB	0 dB - 3 dB	-2 dB - 0 dB	< -5 dB

Tabla 3.16 Moda de la SIR con desvanecimiento rápido.

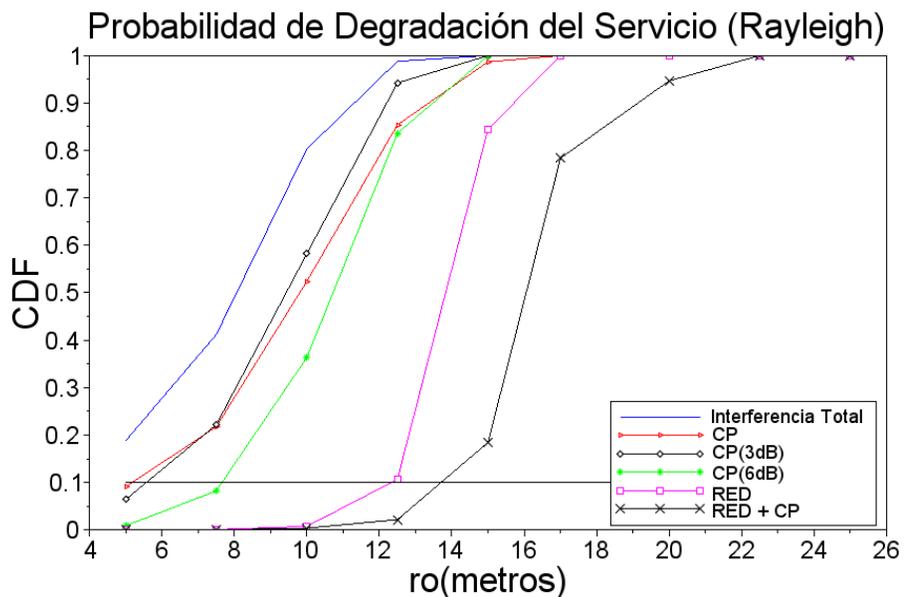


Figura 3.14 Función de distribución acumulativa en el escenario 2 con 100 femtoceldas y SIR objetivo de 0 dB con desvanecimiento rápido.



Con el objetivo de evaluar la calidad de servicio brindado al macro-usuario, alejado de la macro estación base a diferentes distancias, se obtuvo la tabla 3.16 (para mayor detalle remitirse al apéndice 4) y la figura 3.14, las cuales, presentan la moda de la SIR en el macro-usuario y la probabilidad de degradación del servicio, en los diferentes escenarios con 400 femtoceldas, donde se observa un incremento considerable en la probabilidad de degradación del servicio brindado al macro-usuario (MU). Por ejemplo, mientras que en la figura 3.11 que representa el escenario con 100 femtoceldas se presentó 100 % de probabilidad de degradación a una distancia de 22.5 m, en el escenario con 400 femtoceldas, la probabilidad de degradación aumentó considerablemente a partir de una distancia igual a 15 m, hasta llegar a una probabilidad de degradación del 100% a una distancia igual a 17 m del macro-usuario (MU) utilizando casi todos los mecanismos de coordinación a excepción de regiones de exclusión dinámica con control ideal de potencia donde se incrementó 50%. A pesar del aumento de interferencia y probabilidad de degradación se observa como los diferentes mecanismos de coordinación logran mitigar formidablemente la interferencia y permiten disminuir la probabilidad de degradación del servicio en comparación con el escenario sin coordinación (interferencia total).

RAYLEIGH	SIR PROMEDIO				
	$r_o = 5 \text{ m}$	$r_o = 10 \text{ m}$	$r_o = 15 \text{ m}$	$r_o = 20 \text{ m}$	$r_o = 25 \text{ m}$
Interferencia Total	3.73 dB	- 3.52 dB	- 9.53 dB	-12.47 dB	- 15.79 dB
Control De Potencia Discreto 3 dB	5.95 dB	- 1.30 dB	- 7.31 dB	-10.26 dB	- 13.57 dB
Control De Potencia Discreto 6 dB	7.81 dB	- 0.55 dB	- 5.44 dB	- 8.41 dB	- 11.72 dB
Control Ideal De Potencia	6.31 dB	- 0.94 dB	- 6.95 dB	-9.88 dB	- 13.25 dB
Regiones De Exclusión Dinámica	12.07 dB	4.78 dB	-1.19 dB	- 4.16 dB	- 7.46 dB
Regiones De Exclusión Dinámica + Control Ideal De Potencia	14.34 dB	7.05 dB	1.07 dB	- 1.90 dB	- 5.22 dB

Tabla 3.17 SIR promedio en el escenario 2 con 400 femtoceldas (Rayleigh).

La tabla 3.17 presenta el promedio de la relación señal a interferencia (SIR) percibida por el macro-usuario (MU) en el escenario 2 con 400 femtoceldas desplegadas, modelado con desvanecimiento rápido, donde la relación señal a interferencia (SIR) se redujo considerablemente en comparación con el escenario 2 con 100 femtoceldas desplegadas. Por ejemplo, para el escenario con 100 femtoceldas modelado con desvanecimiento rápido, en el peor de los casos (Interferencia total) se obtuvo - 7.82 dB y en el mejor (RED + CP) se obtuvo 24.26 dB, mientras que en el escenario con 400 femtoceldas se obtuvo - 15.79 dB y 14.34 dB respectivamente, disminuyendo la SIR aproximadamente en 8 dB, lo cual afecta la calidad de los servicios brindados por una red celular.

3.2.2. Escenario 3.

En este escenario se despliegan un número variable de femtoceldas, representadas en la primera región de coordinación con color rojo y en la segunda región de coordinación con color blanco, luego la macro estación base de color verde a una distancia (r_0) del macro-usuario (MU) igual a 10 m, y por último el macro-usuario (MU) representado por un círculo de color azul, tal como se indica en la figura 3.15.

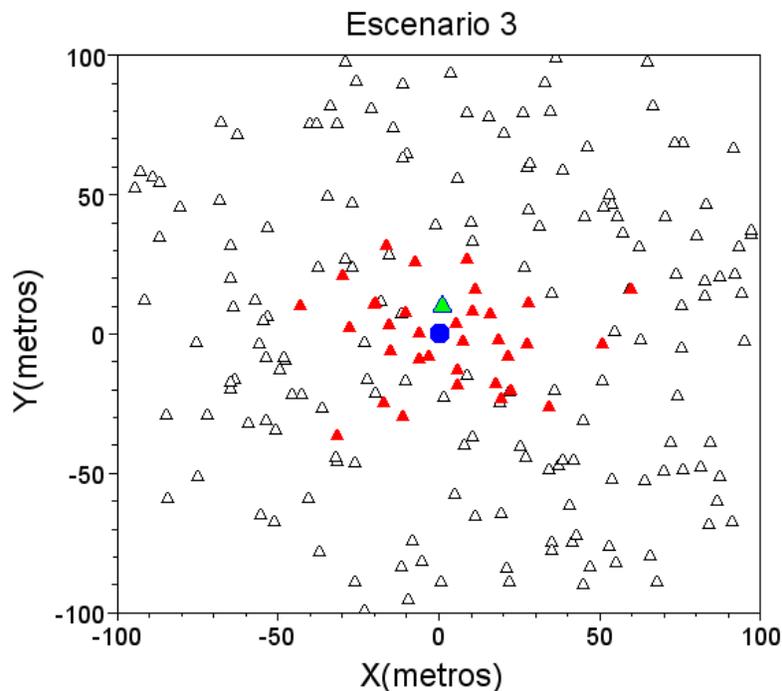


Figura 3.15 Escenario 3 con densidad de 40 a 400 femtoceldas.



➤ Análisis con desvanecimiento lento (Log Normal)

LOG-NORMAL	Moda de la SIR				
	$\lambda = 0.001$ (femtoceldas /m ²)	$\lambda = 0.003$ (femtoceldas /m ²)	$\lambda = 0.005$ (femtoceldas /m ²)	$\lambda = 0.007$ (femtoceldas /m ²)	$\lambda = 0.01$ (femtoceldas /m ²)
Interferencia Total	> 7 dB	3 dB - 7 dB	< -5 dB	< -5 dB	< -5 dB
Control De Potencia Discreto 6 dB	> 7 dB	3 dB - 7 dB	3 dB - 7 dB	0 dB - 3 dB	0 dB - 3 dB
Regiones De Exclusión Dinámica + Control Ideal De Potencia	> 7 dB	> 7 dB	> 7 dB	> 7 dB	> 7 dB

Tabla 3.18 Moda de la SIR con desvanecimiento lento.

Con el objetivo de evaluar la calidad de servicio brindado al macro-usuario, en los escenarios con distintas densidades de femtoceldas desplegadas, se obtuvo la tabla 3.18 (para más detalle remitirse al apéndice 5), donde se aprecia que a medida que las femtoceldas emplean los diferentes mecanismos de coordinación, las barras con mayor número de repeticiones (moda), se desplazan hacia la derecha, evidenciando un incremento cada vez mayor de la SIR en el macro-usuario (MU). Por ejemplo, se observa como en el escenario donde no existe coordinación (interferencia total) la SIR en el macro-usuario (MU) disminuye hasta 3 dB con una densidad de 0.003 femtoceldas / m² (120 femtoceldas) y cae a valores por debajo de -5 dB cuando se incrementa la densidad a 0.007 femtoceldas / m² (280 femtoceldas), degradando el servicio; mientras que en el escenario coordinado haciendo uso de regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia, la SIR en el macro-usuario (MU) se mantiene por encima de 7 dB para todos los valores de densidad, permitiendo a la macro estación base brindar un buen servicio al macro usuario (MU).

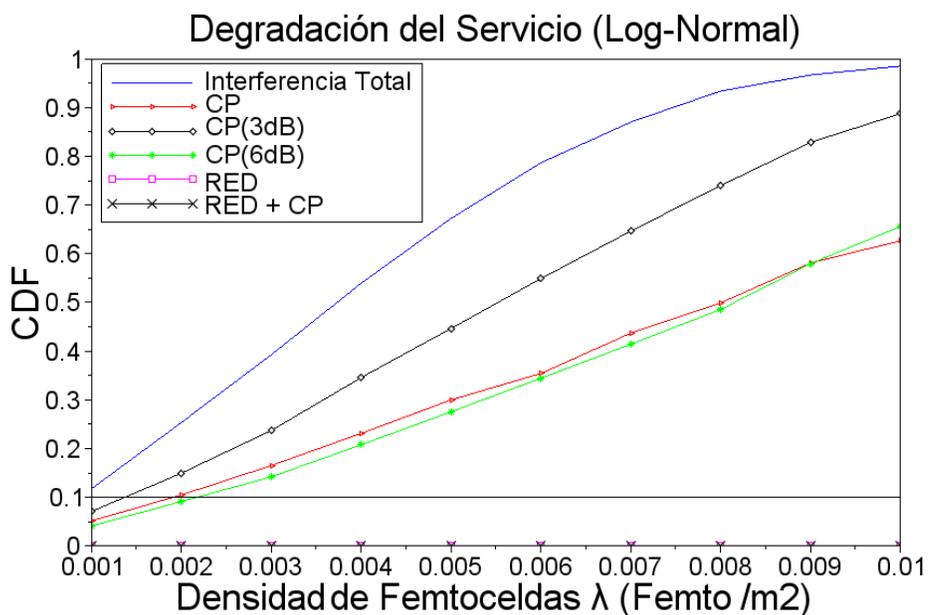


Figura 3.16 Función de distribución acumulativa en el escenario 3 con SIR objetivo de 0 dB y desvanecimiento lento.

El objetivo de este escenario es incrementar progresivamente la densidad de femtoceldas (λ), desde $\lambda = 0.001$ femtoceldas / m² (40 femtoceldas) hasta $\lambda = 0.01$ femtoceldas / m² (400 femtoceldas), observando cómo afecta la relación señal a interferencia (SIR) y la probabilidad de degradación del servicio brindado al macro-usuario (MU).



LOG-NORMAL	SIR PROMEDIO				
	$\lambda = 0.001$ (femtoceldas /m ²)	$\lambda = 0.003$ (femtoceldas /m ²)	$\lambda = 0.005$ (femtoceldas /m ²)	$\lambda = 0.007$ (femtoceldas /m ²)	$\lambda = 0.01$ (femtoceldas /m ²)
Interferencia Total	7.36 dB	-0.18 dB	- 3.20 dB	- 5.23 dB	- 7.56 dB
Control De Potencia Discreto 3 dB	9.20 dB	2.50 dB	-0.73 dB	- 2.68 dB	- 4.93 dB
Control De Potencia Discreto 6 dB	10.75 dB	4.49 dB	1.44 dB	- 0.41 dB	- 2.56 dB
Control Ideal De Potencia	12.40 dB	5.17 dB	1.75 dB	- 0.32 dB	- 2.61 dB
Regiones De Exclusión Dinámica	14.94 dB	10.06 dB	7.81 dB	6.33 dB	4.76 dB
Regiones De Exclusión Dinámica + Control Ideal De Potencia	19.77 dB	14.14 dB	11.83 dB	10.35 dB	8.76 dB

Tabla 3.19 SIR promedio en el escenario 3 (Log-Normal).

La figura 3.16 y tabla 3.19 muestran como en el escenario sin coordinación (Interferencia Total) a partir de $\lambda = 0.004$ (femtoceldas/m²) (160 femtoceldas) la probabilidad de degradación del servicio está por encima de 50% y el valor de relación señal a interferencia (SIR) es bajo, hasta 3 dB por debajo del valor de SIR objetivo; mientras que en los escenarios coordinados, haciendo uso de mecanismos de coordinación como control ideal de potencia (CP) y control de potencia discreto de 6 dB (CP 6 dB), se presenta un valor igual de probabilidad de degradación (50%) a partir de $\lambda = 0.008$ (femtoceldas/m²) (320 femtoceldas), 160 femtoceldas más que en el escenario sin coordinación y un valor promedio de relación señal a interferencia (SIR) de 0 dB, igual a la SIR objetivo; y si cada femtocelda ubicada en la primera región de coordinación aplica el mecanismo de región de exclusión dinámica con o sin control ideal de potencia (RED o



RED + CP) la probabilidad de que el servicio se degrade es de 0% para cualquier densidad de femtoceldas (λ), obteniendo un valor de relación señal a interferencia (SIR) de 6 dB por encima del SIR objetivo.

Probabilidad de Degradación	λ (femtoceldas/m ²) Log-Normal					
	Interferencia Total	CP 3 dB	CP	CP 6 dB	RED	RED + CP
10%	< 0.001	0.001	0.002	0.002	> 0.01	> 0.01

Tabla 3.20 Densidad de femtoceldas con 10% de probabilidad de degradación.

Para evaluar la calidad del servicio brindado al macro-usuario (MU), se observa en cada escenario el valor máximo de densidad de femtoceldas λ (femtoceldas/ m²) que se puede desplegar para mantener la probabilidad de degradación de servicio por debajo de 10%. De esta manera, de la tabla 3.20 se observa que para mantener por debajo tal probabilidad de degradación, en el escenario sin coordinación (interferencia total), el valor de densidad de femtoceldas debe estar por debajo de 0.001 femtoceldas/m² (< 40 femtoceldas); en el escenario coordinado con control de potencia discreto de 3 dB una densidad de 0.001 femtoceldas/m² (40 femtoceldas); con control ideal de potencia y discreto de 6 dB una densidad de 0.002 femtoceldas/m² (80 femtoceldas); con regiones de exclusión dinámica con y sin con control ideal de potencia una densidad indefinida, ya que hasta una densidad de 0.01 femtoceldas/m² (400 femtoceldas) la probabilidad siempre es de 0%, demostrando la capacidad de mitigación de la interferencia CCI.



➤ Análisis con desvanecimiento rápido (Rayleigh)

RAYLEIGH	Moda de la SIR				
	$\lambda = 0.001$ (femtoceldas /m ²)	$\lambda = 0.003$ (femtoceldas /m ²)	$\lambda = 0.005$ (femtoceldas /m ²)	$\lambda = 0.007$ (femtoceldas /m ²)	$\lambda = 0.01$ (femtoceldas /m ²)
Interferencia Total	> 7 dB	> 7 dB	3 dB - 7 dB	0 dB - 3 dB	< -5 dB
Control De Potencia Discreto 6 dB	> 7 dB	> 7 dB	3 dB - 7 dB	3 dB - 7 dB	3 dB - 7 dB
Regiones De Exclusión Dinámica + Control Ideal De Potencia	> 7 dB	> 7 dB	> 7 dB	> 7 dB	> 7 dB

Tabla 3.21 Moda de la SIR con desvanecimiento rápido.

En este escenario modelado con desvanecimiento rápido, el macro-usuario (MU) percibe menor interferencia, debido a que las señales interferentes presentan mayor atenuación, de esta forma, de acuerdo a la tabla 3.21 (para más detalle remitirse al apéndice 6), las barras con mayor número de repeticiones (moda) se desplazan hacia la derecha, indicando un incremento de la SIR en el macro-usuario (MU) en comparación con el escenario con desvanecimiento lento. Por ejemplo, mientras que en el escenario sin coordinación (interferencia total) con desvanecimiento lento la SIR toma valores por debajo de -5 dB a partir de una densidad de femtoceldas igual a 0.005 femtoceldas/m² (200 femtoceldas), en este escenario modelado con desvanecimiento rápido la SIR toma valores por debajo de -5dB a partir de una densidad igual a 0.01 femtoceldas/m² (400 femtoceldas), aproximadamente 200 femtoceldas más. Por otro lado en el escenario coordinado utilizando regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia en todos los valores de densidad de femtoceldas el valor de SIR es siempre por encima de 7 dB, lo cual permite concluir que los mecanismos de coordinación ayudan a mitigar la interferencia, permitiendo a la macro estación base brindar buen servicio al macro-usuario (MU).

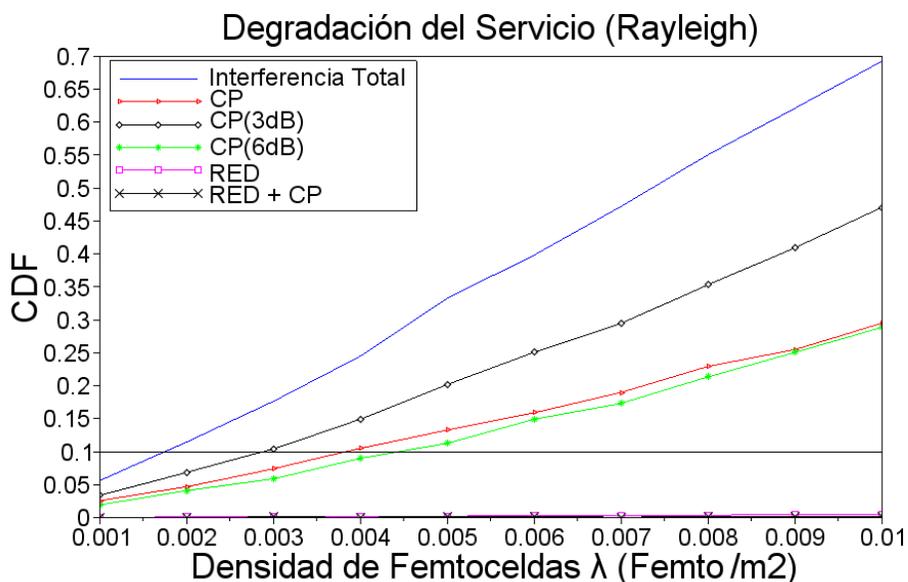


Figura 3.17 Función de distribución acumulativa en el escenario 3 con SIR objetivo de 0 dB y desvanecimiento rápido.

RAYLEIGH	SIR PROMEDIO				
	$\lambda = 0.001$ (femtoceldas /m ²)	$\lambda = 0.003$ (femtoceldas /m ²)	$\lambda = 0.005$ (femtoceldas /m ²)	$\lambda = 0.007$ (femtoceldas /m ²)	$\lambda = 0.01$ (femtoceldas /m ²)
Interferencia Total	11.59 dB	4.56 dB	1.18 dB	- 0.79 dB	- 3.06 dB
Control De Potencia Discreto 3 dB	12.88 dB	6.34 dB	3.19 dB	1.31 dB	- 0.82 dB
Control De Potencia Discreto 6 dB	13.93 dB	7.80 dB	4.85 dB	3.08 dB	1.05 dB
Control Ideal De Potencia	16.71 dB	9.49 dB	6.15 dB	4.05 dB	1.77 dB
Regiones De Exclusión Dinámica	16.70 dB	11.41 dB	9.05 dB	7.51 dB	5.86 dB
Regiones De Exclusión Dinámica + Control Ideal De Potencia	21.20 dB	15.67 dB	13.20 dB	11.67 dB	9.98 dB

Tabla 3.22 SIR promedio en el escenario 3 (Rayleigh).



Probabilidad de Degradación	λ (femtoceldas / m ²) Rayleigh					
	Interferencia Total	CP 3 dB	CP	CP 6 dB	RED	RED + CP
10%	0.0015	0.003	0.004	0.0045	> 0.01	> 0.01

Tabla 3.23 Densidad de femtoceldas con 10% de probabilidad de degradación.

La figura 3.17 y la tabla 3.22 permiten comprobar como las señales interferentes emitidas por cada una de las femtoceldas en el escenario modelado con desvanecimiento rápido, el macro-usuario (MU) las percibe con menor potencia que en el escenario modelado con desvanecimiento lento, disminuyendo la interferencia co-canal (CCI) y aumentando el promedio de la SIR percibida por el macro-usuario (MU). Por ejemplo, la tabla 3.23 en el escenario con desvanecimiento rápido la macro estación base puede brindar servicio con probabilidad de degradación por debajo de 10% en el escenario sin coordinación (interferencia total), con una densidad de $\lambda = 0.0015$ femtoceldas/m² (60 femtoceldas) desplegadas, a diferencia del escenario modelado con desvanecimiento lento, donde la densidad de femtoceldas debe estar por debajo de 0.001 femtoceldas/m² (< 40 femtoceldas), y de la misma forma, en el escenario aplicando control ideal de potencia (CP) y control de potencia discreto (CP 6 dB) con $\lambda = 0.004$ femtoceldas/m² (160 femtoceldas), 80 femtoceldas desplegadas más que en el escenario con desvanecimiento lento.

3.3 RUIDO TÉRMICO DESPRECIABLE

Por último se comprueba por medio de las ecuaciones 3.1 y 3.2 qué el ruido térmico puede considerarse despreciable considerando: la figura de ruido igual a 7 dB, temperatura de 290 K, constante de Boltzmann igual a 1.38×10^{-23} y ancho de banda de 5 Mhz, de esta forma,

$$\text{Promedio de CCI} = \frac{\sum j_j}{\# \text{Femtoceldas}} = 69.298 \times 10^{-6} \text{ W} = -11.592774 \text{ dBm} \quad (3.1)$$

$$\text{Potencia de Ruido Termico} = T K Bw F = 2.001 \times 10^{-13} \text{ W} \quad (3.2)$$

dónde:

F , figura de ruido en dB.

T , temperatura en el receptor en grados Kelvin.

K , constante de Boltzmann.

B_w , ancho de banda en Mega Hertz.

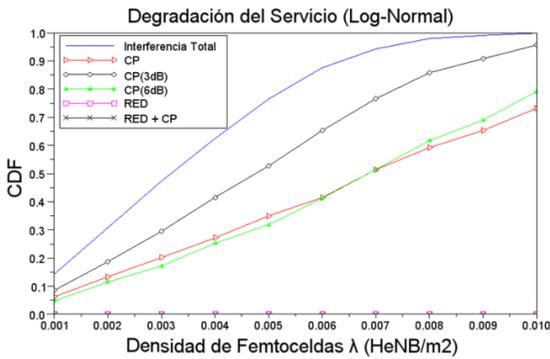


Figura 3.18 (a) Función de distribución acumulativa en el escenario 3 con desvanecimiento rápido sin ruido.

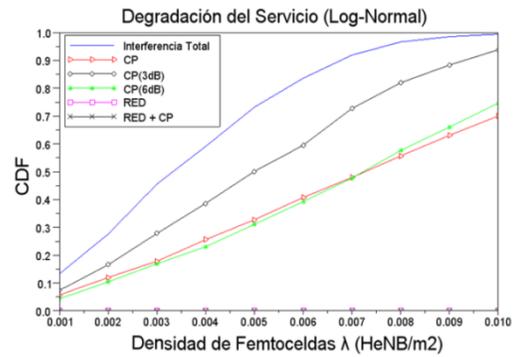


Figura 3.18 (b) Función de distribución acumulativa en el escenario 3 con desvanecimiento rápido más ruido.

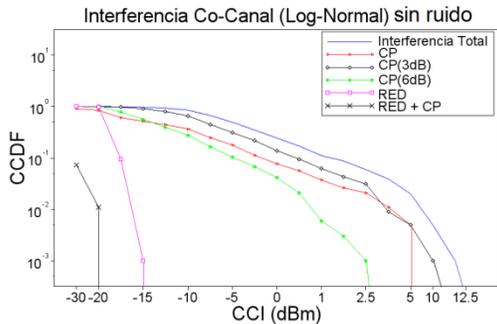


Figura 3.19 (a) Función de distribución acumulativa complementaria de la interferencia co-canal sin ruido percibida por el macro-usuario (MU) con desvanecimiento lento.

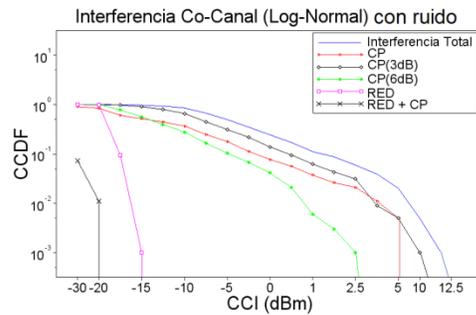


Figura 3.19 (b) Función de distribución acumulativa complementaria de la interferencia co-canal con ruido percibida por el macro-usuario (MU) con desvanecimiento lento.

En las figuras 3.18 (a), 3.18 (b) y las figuras 3.19 (a), 3.19 (b), se observar que debido a que el promedio de la interferencia co-canal (CCI) presente en el sistema es mucho mayor que el ruido térmico con una relación de 10^7 , no se observa un cambio en las curvas de



Interferencia co-canal (CCI) y probabilidad de degradación del servicio brindado al macro-usuario (MU) al considerar la potencia de ruido térmico, por lo cual la decisión de considerar despreciable el ruido para este estudio, es completamente acertada.



4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS DE GRADO PROPUESTOS

4.1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado enfocó sus esfuerzos en el desarrollo e implementación de una simulación básica, estática, a nivel de sistema, para analizar la interferencia co-canal y probabilidad de degradación en redes heterogéneas; diseñando tres escenarios de simulación en donde interactúan una macro estación base, un macro-usuario (MU), y numerosas femtoceldas dependiendo del escenario, con el objetivo de caracterizar la interferencia co-canal y determinar cómo ésta afecta la calidad del servicio brindado al macro-usuario (MU). Adicionalmente, se implementaron diferentes mecanismos de coordinación para tratar de mitigar la interferencia co-canal y controlar los efectos que esta implica.

En este capítulo se presentan las conclusiones y distintas recomendaciones sobre futuras líneas de investigación que pueden desprenderse del análisis y desarrollo del trabajo de grado realizado, con el fin de brindar continuidad a los estudios enfocados a la interferencia co-canal en redes heterogéneas.

4.2 CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos y el análisis realizado en el presente trabajo se plantean las siguientes conclusiones:

1. La integración de diferentes mecanismos de coordinación de interferencia permiten incrementar la calidad del servicio brindado al MU por la macro estación base en presencia de una red heterogénea con femto estaciones base, por medio de la reducción de la probabilidad de degradación del servicio.



2. Los mecanismos relacionados con gestión de espectro son más efectivos al mitigar la interferencia que los mecanismos relacionados con gestión de potencia, permitiendo obtener menores valores de probabilidad de degradación de servicio para todos los valores de distancia entre el macro-usuario (MU) y la macro estación base (r_0) y valores de densidad de femto estaciones base (λ).
3. El mecanismo de control ideal de potencia logra mitigar más la interferencia que el mecanismo de control de potencia discreto de 3 dB, reduciendo en 3 dB más la interferencia co-canal percibida por el macro-usuario (MU) tanto en el escenario modelado con desvanecimiento lento como en el escenario modelado con desvanecimiento rápido, sin embargo, es menos eficaz que el mecanismo de control de potencia discreto de 6 dB.
4. Los diferentes mecanismos de coordinación de interferencia permiten disminuir considerablemente la probabilidad de degradación del servicio brindado al MU. El caso más representativo es el de regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia, donde la probabilidad de degradación de servicio se mantiene en 0% para todos los valores de densidad de femto estaciones base (λ) considerados tanto en el escenario modelado con desvanecimiento lento como en el escenario modelado con desvanecimiento rápido, incrementando la calidad de servicio en comparación con el escenario sin coordinación (interferencia total), donde la probabilidad de degradación de servicio alcanza el valor del 100%.
5. El mecanismo de regiones de exclusión dinámica más control de potencia permite disminuir el nivel de interferencia co-canal presente en el sistema hasta 14 dB en el escenario modelado con desvanecimiento Log-Normal, incrementando la SIR en el macro-usuario (MU) y por lo tanto la calidad del sistema móvil celular de banda ancha heterogéneo.
6. Debido a que el desvanecimiento lento (Log-Normal) genera una menor atenuación que el desvanecimiento rápido en las señales interferentes emitidas por cada una de las femtoceldas, el macro usuario (MU) percibe con mayor potencia las señales interferentes en el escenario modelado con desvanecimiento lento, por esta razón, los diferentes mecanismos de coordinación logran mitigar y controlar más la interferencia co-canal en este escenario.
7. De lograr exitosamente y adecuadamente la gestión de interferencia en las actuales y futuras redes heterogéneas, se podría integrar una cantidad de pequeñas celdas a la red, incrementando la calidad del servicio.



8. Scilab®, como lenguaje de programación de alto nivel para cálculo científico, resulta útil en el proceso de estudiar, analizar y comprender el funcionamiento y el desempeño de sistemas complejos de telecomunicaciones, como alternativa viable ante la dificultad de su construcción o adquisición. Del mismo modo, simular un sistema de comunicaciones evita correr riesgos operativos al realizar pruebas sobre sistemas reales.
9. La simulación aquí presentada sirve como herramienta de soporte para los procesos de enseñanza y aprendizaje en el área de los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricas. Por su relativa sencillez, será una base y una guía para el desarrollo de trabajos futuros.

4.1 TRABAJOS DE GRADO PROPUESTOS

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado se presentan como referencia para trabajos futuros que busquen analizar el comportamiento de sistemas enfocados en la línea de investigación de señales, sistemas de acceso y difusión basados en radio. Para ello se propone:

- Análisis de capacidad en redes heterogéneas haciendo uso de técnicas basadas en extensión de cobertura.
- Análisis de interferencia co-canal en el enlace de subida en redes heterogéneas haciendo uso de diferentes mecanismos de coordinación que permitan la gestión de los recursos radio.
- Análisis de interferencia co-canal en el mismo nivel (Co Layer) y entre niveles (Cross Layer) en redes heterogéneas haciendo uso de diferentes tipos de pequeñas celdas, mecanismos de coordinación y distintos modelos de propagación.
- Análisis de movilidad de usuarios entre diferentes tipos de celdas, reduciendo la complejidad y el tiempo de traspasos (*handovers*).
- Desarrollo de algoritmos basados en SON que permitan reducir la interferencia y aumentar la capacidad y cobertura de la red.
- Análisis, diseño y despliegue de redes heterogéneas basadas en la tecnología LTE.

APÉNDICES

INTRODUCCIÓN

En cada histograma de la relación señal a interferencia, cada color representa un rango establecido, donde el color azul indica las veces en que el valor de SIR tomo valores por debajo de -5 dB, el color verde representa un rango entre -5 dB y -3.5 dB, el color rojo representa un rango entre -3.5 dB y -2 dB, el color azul agua marina representa un rango entre -2 dB y 0 dB, el color morado representa un rango entre 0 dB y 3 dB, el color amarillo representa un rango entre 3 dB y 7 dB y el color negro representa las veces en que el valor de SIR tomo valores por encima de 7 dB. Cabe resaltar que la SIR objetivo (0 dB) se encuentra en medio del color azul agua marina ([-2 dB a 0 dB]) y el color morado ([0 dB a 3 dB]).

APÉNDICE 1: ESCENARIO 2- 100 FEMTOCELDAS: ANÁLISIS CON DESVANECIMIENTO LENTO (LOG NORMAL)

Las figuras 1.1 a la 1.3 presentan por medio de histogramas, tras simular 10,000 veces el escenario 2 con 100 femtoceldas y desvanecimiento lento (Log-Normal), el número de veces que la SIR en el macro-usuario (MU) se encuentra dentro de diferentes rangos establecidos variando la distancia entre el macro-usuario (MU) y la macro estación base, teniendo en cuenta el escenario sin mecanismos de coordinación, y el escenario coordinado utilizando control de potencia discreto de 6 dB y regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia (RED + CP).

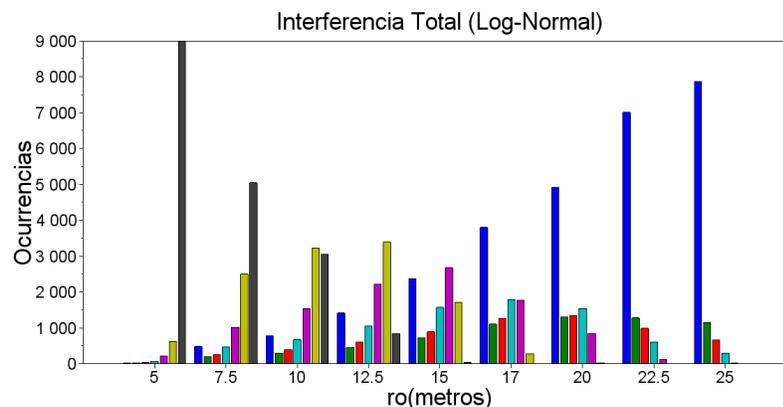


Figura Ap. 1.1 Histograma SIR con interferencia total.

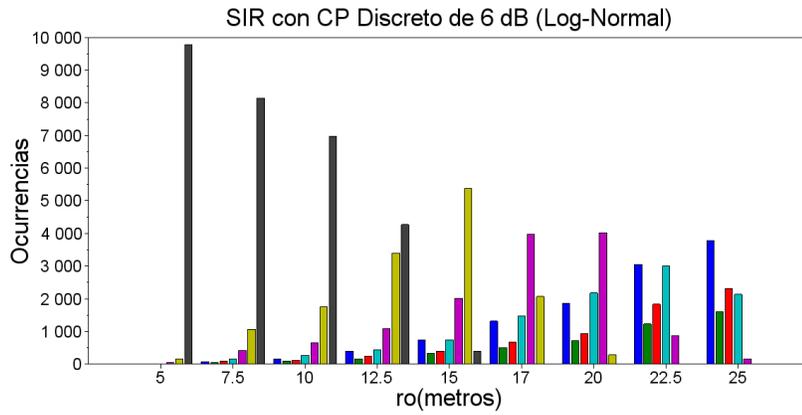


Figura Ap. 1.2 Histograma SIR CP 6dB.

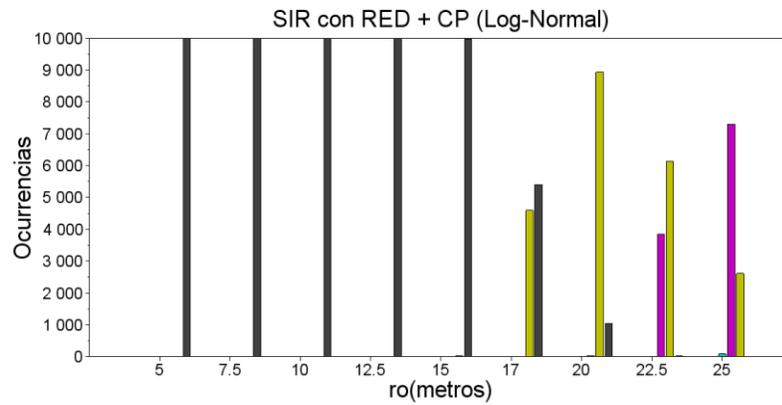


Figura Ap. 1.3 Histograma SIR con RED + CP.



APÉNDICE 2: ESCENARIO 2- 100 FEMTOCELADAS: ANÁLISIS CON DESVANECIMIENTO RÁPIDO (RAYLEIGH)

Las figuras 2.1 a la 2.3 presentan por medio de histogramas, tras simular 10,000 veces el escenario 2 con 100 femtoceldas, el número de veces que la SIR en el macro-usuario (MU) se encuentra dentro de diferentes rangos establecidos variando la distancia entre el macro-usuario (MU) y la macro estación base, teniendo en cuenta el desvanecimiento rápido (Rayleigh) en el escenario sin mecanismos de coordinación, y en el escenario coordinado utilizando control de potencia discreto de 6 dB y regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia (RED + CP).

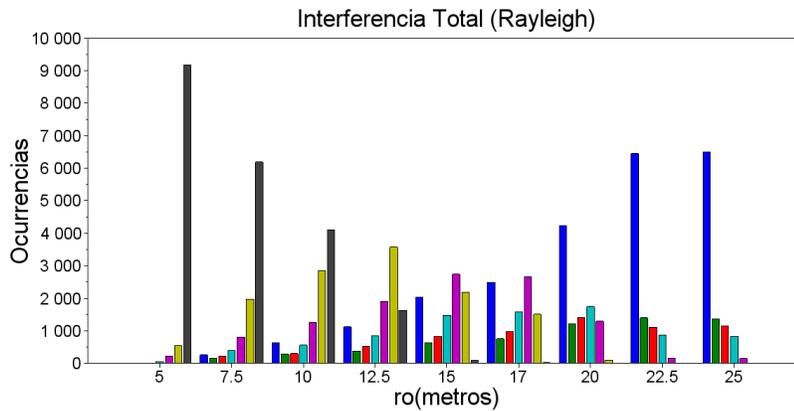


Figura Ap. 2.1 Histograma SIR con interferencia total.

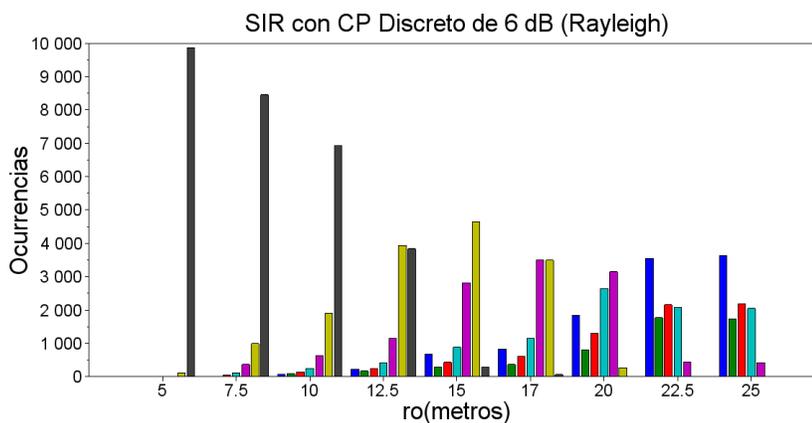


Figura Ap. 2.2 Histograma SIR con CP 6 dB.

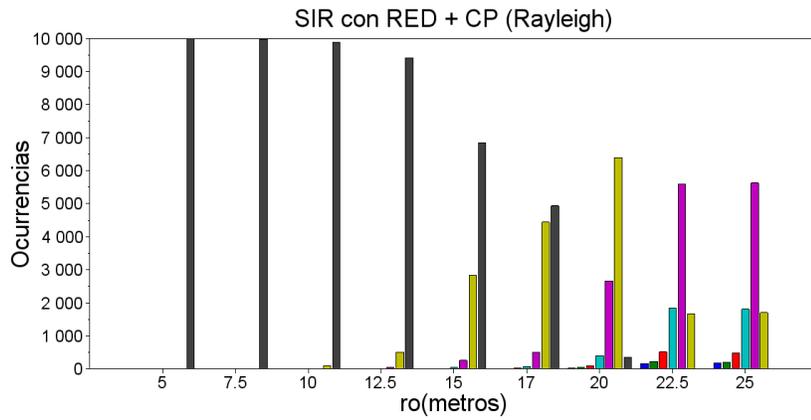


Figura Ap. 2.3 Histograma SIR con RED + CP.



APÉNDICE 3. ESCENARIO 2 - 400 FEMTOCELADAS: ANÁLISIS CON DESVANECIMIENTO LENTO (LOG NORMAL)

Las figuras 3.1 a la 3.3 presentan por medio de histogramas, tras simular 10,000 veces el escenario 2 con 400 femtoceldas, el número de veces que la SIR en el macro-usuario (MU) se encuentra dentro de diferentes rangos establecidos variando la distancia entre el macro-usuario (MU) y la macro estación base, teniendo en cuenta el desvanecimiento lento (Log-Normal), en el escenario sin mecanismos de coordinación y en el escenario coordinado utilizando control de potencia discreto de 6 dB y regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia (RED + CP).

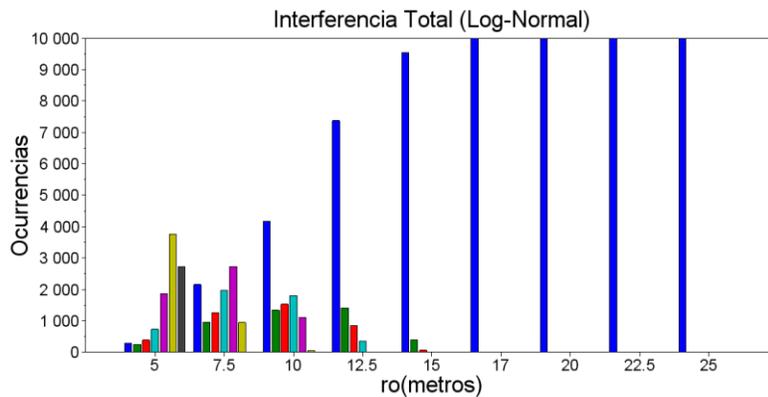


Figura Ap. 3.1 Histograma SIR con interferencia total.

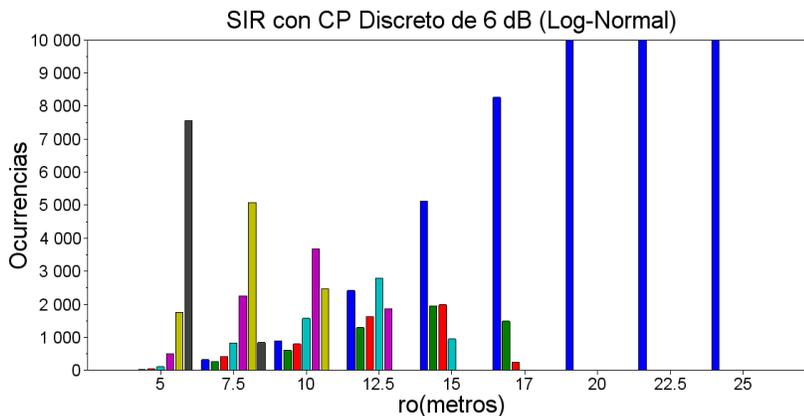


Figura Ap. 3.2 Histograma SIR con CP 6 dB.

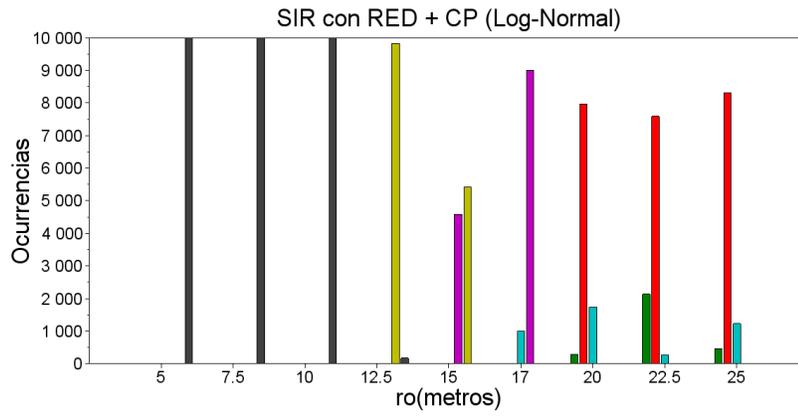


Figura Ap. 3.3 Histograma SIR con RED + CP.



APÉNDICE 4. ESCENARIO 2 - 400 FEMTOCELADAS: ANÁLISIS CON DESVANECIMIENTO RÁPIDO (RAYLEIGH)

Las figuras 4.1 y 4.3 presentan por medio de histogramas, tras simular 10,000 veces el escenario 2 con 400 femtoceldas, el número de veces que la SIR en el macro-usuario (MU) se encuentra dentro de diferentes rangos establecidos variando la distancia entre el macro-usuario (MU) y la macro estación base, teniendo en cuenta el desvanecimiento rápido (Rayleigh) en el escenario sin mecanismos de coordinación, y en el escenario coordinado utilizando control de potencia discreto de 6 dB y regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia (RED + CP).

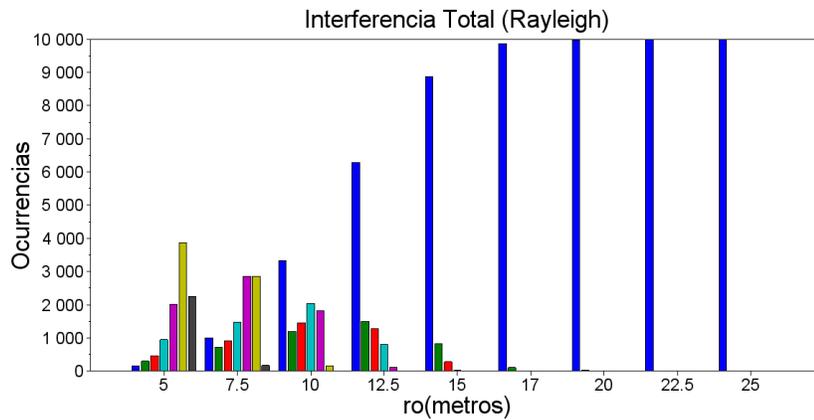


Figura Ap. 4.1 Histograma SIR con interferencia total.

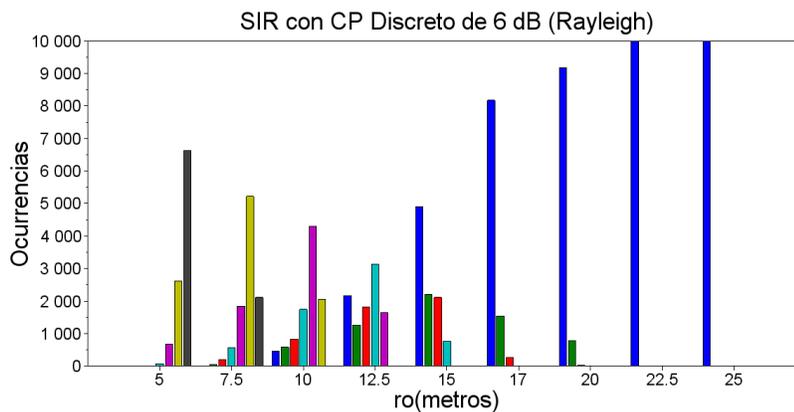


Figura Ap. 4.2 Histograma SIR con CP 6 dB.

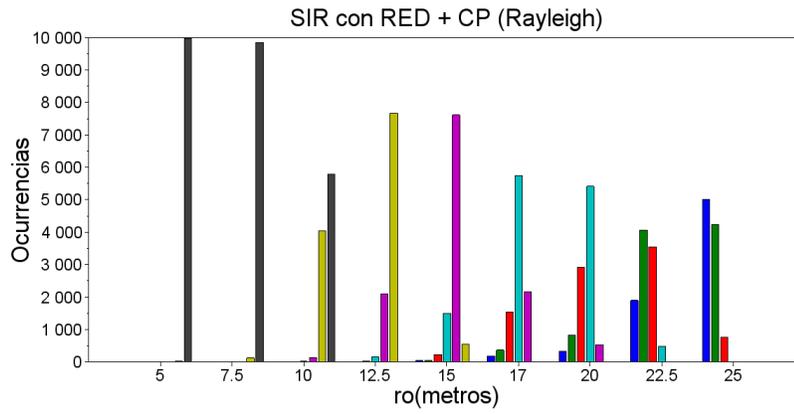


Figura Ap. 4.3 Histograma SIR con RED + CP.



APÉNDICE 5. ESCENARIO 3: ANÁLISIS CON DESVANECIMIENTO LENTO (LOG NORMAL)

Las figuras 5.1 y 5.3 presentan por medio de histogramas, tras simular 10,000 veces el escenario 3, el número de veces que la SIR en el macro-usuario (MU) se encuentra dentro de diferentes rangos establecidos, variando la densidad de femtoceldas desplegadas, teniendo en cuenta el desvanecimiento lento (Log-Normal) en el escenario sin mecanismos de coordinación y en el escenario coordinado utilizando control de potencia discreto de 6 dB y regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia (RED + CP).

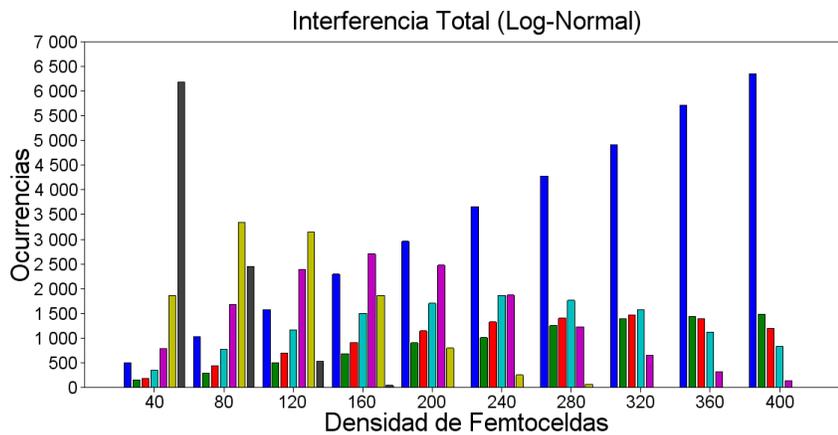


Figura Ap. 5.1 Histograma SIR con interferencia total.

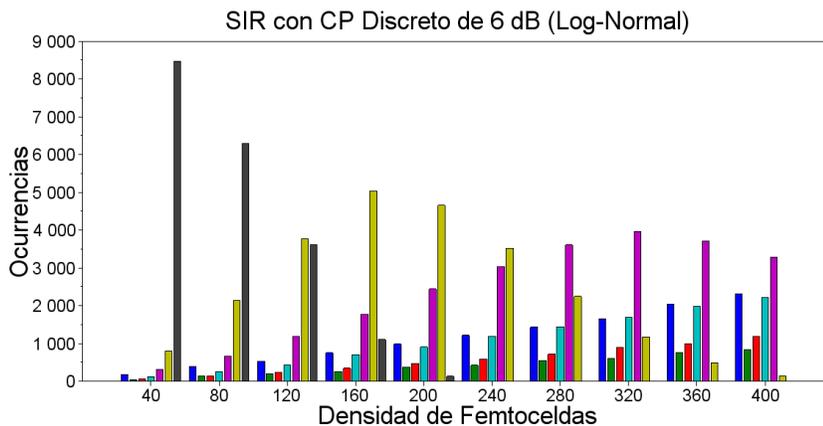


Figura Ap. 5.2 Histograma SIR con CP 6 dB.

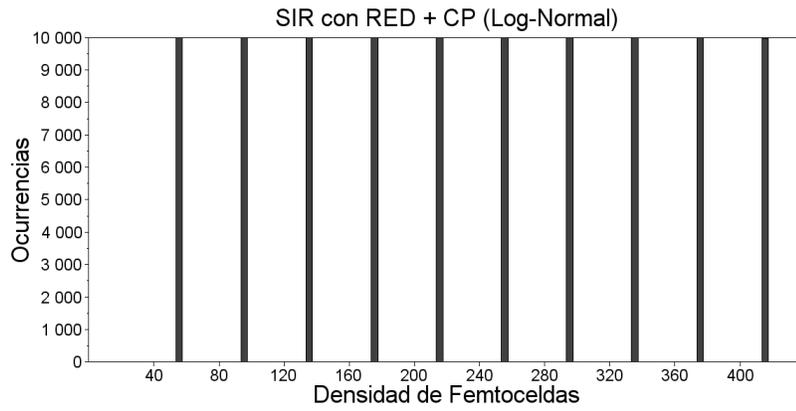


Figura Ap. 5.3 Histograma SIR con RED + CP.



APÉNDICE 6. ESCENARIO 3: ANÁLISIS CON DESVANECIMIENTO RÁPIDO (RAYLEIGH)

Las figuras 6.1 a la 6.3 presentan por medio de histogramas, tras simular 10,000 veces el escenario 2, el número de veces que la SIR en el macro-usuario (MU) se encuentra dentro de diferentes rangos establecidos, variando la densidad de femtoceldas desplegadas, teniendo en cuenta el desvanecimiento rápido (Rayleigh) en el escenario sin mecanismos de coordinación y en el escenario coordinado utilizando control de potencia discreto de 6 dB y regiones de exclusión dinámica más control ideal de potencia (RED + CP).

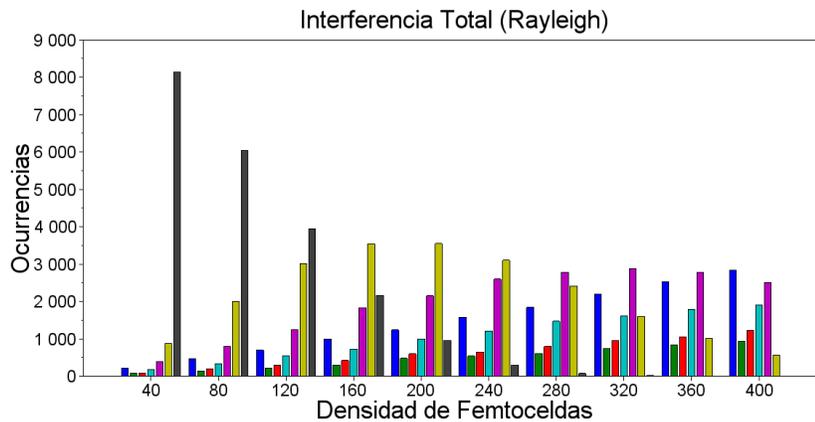


Figura Ap. 6.1 Histograma SIR con interferencia total.

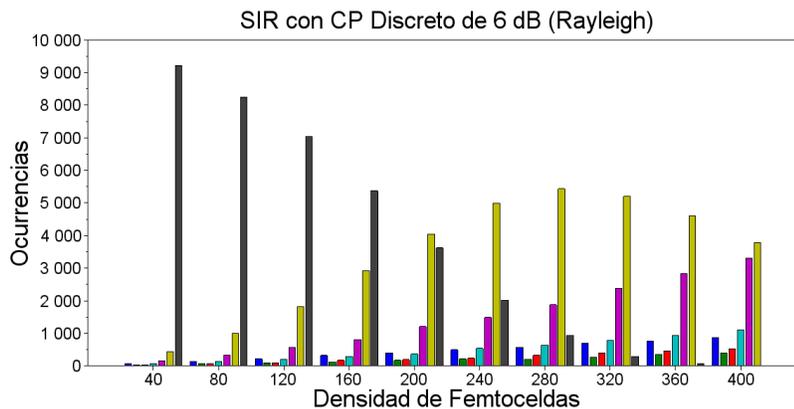


Figura Ap. 6.2 Histograma SIR con CP 6 dB.

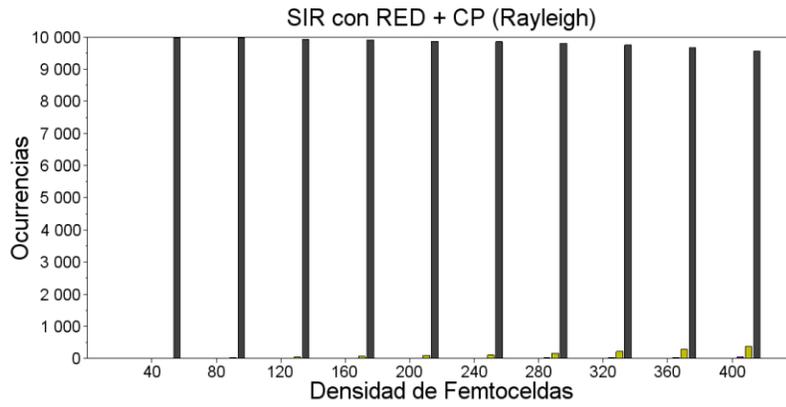


Figura Ap. 6.3 Histograma SIR con RED + CP.



ANEXOS

ANEXO 1. MODELO DE PROPAGACIÓN DE PENDIENTE ÚNICA

La característica más importante de la propagación por canales móviles es la variabilidad de la propagación, consecuencia del carácter zonal de la cobertura y del desplazamiento de los terminales, que se traduce en variaciones del nivel de señal con los emplazamientos y con el tiempo. Por lo tanto, para una potencia transmitida fija, la potencia recibida es una variable aleatoria [46].

La pérdida básica de propagación varia, en primer lugar, con la distancia entre el transmisor y el receptor. La mayoría de los modelos propuestos predice una variación según una ley, de la forma 1.1:

$$l_b(d) = k d^n, \quad (1.1)$$

donde k es una constante que depende del tipo de terreno, de la frecuencia y de la altura de las antenas; el exponente n es función del medio de propagación (escenario) y de la altura de la antena de referencia. La constante k puede determinarse estableciendo la pérdida básica a una distancia de referencia. Si el valor es l_o , la ecuación 1.1 se transforma en la ecuación 1.2:

$$l_b(d) = l_o d^n, \quad (1.2)$$

y en unidades logarítmicas:

$$L_b(d) = L_o + 10n \log(d), \quad (1.3)$$

siendo $L_o = 10 \log(l_o)$.



Esta ley de variación de L_b suele llamarse de *punto-pendiente*, pues su representación gráfica es una línea recta de pendiente $10n$ y cuya ordenada en el origen para $d=1$ es L_o . La ley queda definida una vez conocidos los valores de L_o y n , que pueden obtenerse experimentalmente. Las leyes de la ecuación 1.3 proporcionan un valor promedio de la pérdida básica de propagación a la distancia d .

La influencia del terreno produce una atenuación variable en torno al promedio estimado pronosticado por la ley representada por la ecuación 1.3.

A esta variabilidad debida al terreno entre el transmisor y el receptor se le denomina *desvanecimiento lento o por sombra*. Si se desea modelar con más precisión la pérdida básica en un entorno de punto (x, y) de ubicación de R, es necesario añadir a $l_b(d)$ una función $g(x, y)$, quedando ahora la ecuación 1.4:

$$l_b(d) = l(d) g(x, y) , \quad (1.4)$$

donde se ha representado por $l(d)$ la ley representada en la ecuación 1.1.

Tras numerosas mediciones experimentales, se ha llegado a la conclusión de que $g(x, y)$ puede modelarse mediante una variable aleatoria gaussiana log-normal. En unidades logarítmicas se tendrá:

$$L_b(d) = L(d) + G(x, y) \quad (1.5)$$

Siendo $L(d)$ representada por la ecuación 1.3 y $G(x, y)$ una variable aleatoria gaussiana de media cero y desviación estándar σ (dB) que caracteriza la variabilidad del desvanecimiento lento. El valor de σ depende del tipo de medio (rural, urbano) de la extensión de la zona donde se evalúa la variabilidad y de la ondulación del terreno circundante.

En los canales móviles, sobre todo en medios urbanos a causa de la baja altura de la antena del terminal móvil sobre el suelo (1.5 a 3 m), aparece un nuevo factor de variabilidad debido a la presencia de obstáculos próximos a los móviles tanto naturales como artificiales: árboles, suelo, postes, edificios, etc. Estos originan múltiples trayectos indirectos de propagación con reflexiones especulares o difusas y difracciones. A esta modalidad de propagación se le denomina multitrayecto y es, en general, el mecanismo básico de propagación en los canales móviles.



La propagación multitrayecto origina variaciones muy rápidas del nivel recibido, fenómeno denominado *desvanecimiento rápido*.

Por consiguiente, si se desean conocer valores puntuales de la atenuación de propagación hay que tener también en cuenta el desvanecimiento rápido, que es significativo en recorridos con una longitud de 40λ , aproximadamente.

A tal fin, se incluye en la descripción matemática de la pérdida básica de propagación un factor de desvanecimiento multitrayectorio $r(t, f)$, que depende de la distancia (o del tiempo, para una velocidad de desplazamiento del receptor (v) conocida) y de la frecuencia. En este caso, la pérdida básica de propagación queda modelada mediante la expresión 1.6:

$$l_b(d) = l(d) r(t, f) \quad (1.6)$$

La ecuación 1.7 se expresa en unidades logarítmicas:

$$L_b(d) = L(d) + R(t, f) \quad (1.7)$$



ANEXO 2: DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICAS DE LA PROPAGACIÓN RADIOELÉCTRICA

INTRODUCCIÓN

En los diferentes enlaces, como los son los de comunicaciones móviles, las ondas que llegan a las diferentes posiciones en que puede situarse el receptor encuentran distintas condiciones de propagación en su camino. Además, la señal recibida por el móvil suele ser el resultado de la suma de componentes que se propagan por múltiples trayectos. En consecuencia, las comunicaciones móviles se caracterizan por amplias variaciones del campo eléctrico en función del espacio (variaciones con la ubicación del receptor) y en función del tiempo (variaciones temporales). Las variaciones de campo eléctrico se asocian a distintos modelos de desvanecimiento y se describen mediante diferentes distribuciones estadísticas [46].

ANEXO 2.1: DISTRIBUCIÓN NORMAL DEL CAMPO

En condiciones de desvanecimiento lento, la variación de la intensidad de campo eléctrico (en dB (uV/m) con las ubicaciones puede representarse por una distribución normal o gaussiana con una media \bar{E} y una desviación típica σ_L [46], cuya función de densidad de probabilidad es[46]:

$$f(E) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{E - \bar{E}}{\sigma_L} \right)^2 \right], \quad (2.1)$$

donde \bar{E} es también el valor mediano del campo eléctrico. La desviación típica σ_L depende de la frecuencia y de la extensión e irregularidad del terreno. Para aplicaciones Radio Móvil Privado (PMR, Private Mobile Radio) en las que la cobertura por estación base es relativamente grande, el informe UIT-R RPN 358, facilita los siguientes valores para terrenos medianamente ondulados:

- Bandas de 150 – 250 MHz: 8 dB.
- Banda de 450 MHz: 10 dB.



Para aplicaciones de Telefonía Móvil Pública (PMT, Public Mobile Telephony), en las que el radio celular es pequeño, la recomendación GSM 03.30 proporciona para la banda de 900 MHz, el valor $\sigma = 7 \text{ dB}$.

En ocasiones, se trabaja con potencias en vez de campos eléctricos. Como la relación entre los valores logarítmicos de la potencia y del campo eléctrico es lineal, la función de densidad de probabilidad de la potencia recibida P expresada en unidades logarítmicas, cuando el campo es gaussiano, sigue también una ley gaussiana con la misma desviación típica σ_L :

$$f(P) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{P - \bar{P}}{\sigma_L} \right)^2 \right], \quad (2.2)$$

Si se expresa la potencia en unidades lineales (mw), la función de densidad de probabilidad sigue una ley denominada Log-Normal con mediana \bar{P} y desviación típica σ_n :

$$f(p) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \frac{1}{p} \exp \left\{ -\frac{\left[\ln \left(\frac{p}{\bar{P}} \right) \right]^2}{2\sigma_n^2} \right\}, \quad p \geq 0 \quad (2.3)$$

siendo,

$$p = 10^{0.1p} ; \quad \bar{P} = 10^{0.1\bar{p}} \text{ y } \sigma_n = 0,23\sigma_l \quad (2.4)$$

La distribución Log-Normal se aplica para el cálculo de la interferencia múltiple en el cual hay que sumar las potencias de las señales interferentes en unidades lineales (mw) y determinar la distribución estadística de la suma.

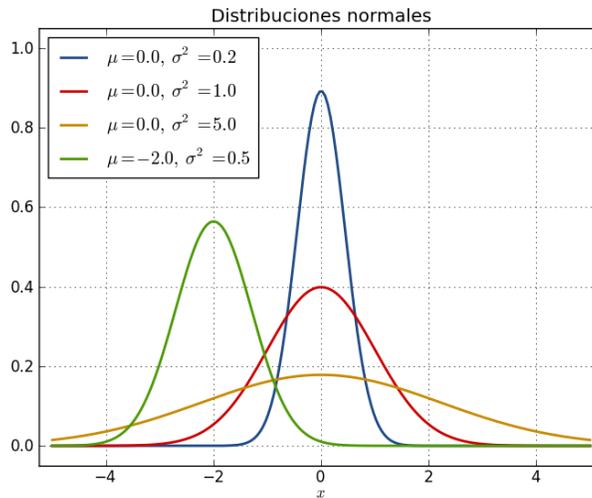


Figura An. 2.1 Función de probabilidad (distribución normal).

ANEXO 2.2: DISTRIBUCIÓN RAYLEIGH

En radiocomunicaciones se utiliza la distribución de Rayleigh para describir la variación estadística de la envolvente de la señal resultante de la propagación multirrayecto, cuando los diferentes rayos tienen amplitudes similares y fases aleatorias [46].

Si denominamos r a esa envolvente (amplitud), la ecuación 2.5 presenta la función de densidad de probabilidad es:

$$p(r) = \frac{r}{b} \exp\left(-\frac{r^2}{2b}\right), \quad r \geq 0 \tag{2.5}$$

La función es uniparamétrica, con parámetro $b = r^2 / 2$, mitad del valor cuadrático medio de r .

La ecuación 2.6 presenta la mediana de la distribución:

$$\bar{r} = 1,18\sqrt{b} \tag{2.6}$$

por lo que, en función de la mediana puede expresarse de la siguiente ecuación:



$$p(r) = 1.386 \frac{r}{\bar{r}^2} \exp\left[-0.693\left(\frac{r}{\bar{r}}\right)^2\right], \quad (2.7)$$

La probabilidad de rebasar un valor r_0 ($r > r_0$) viene dada por la función de distribución complementaria:

$$G(r_0) = \exp\left[-0.693\left(\frac{r_0}{\bar{r}}\right)^2\right]. \quad (2.8)$$

La ecuación 2.9 presenta la función de densidad de probabilidad de la distribución Rayleigh, la cual permite modelar el desvanecimiento rápido por medio de la variable x :

$$f(x; \sigma) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} & , x \geq 0 \\ 0 & , x < 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

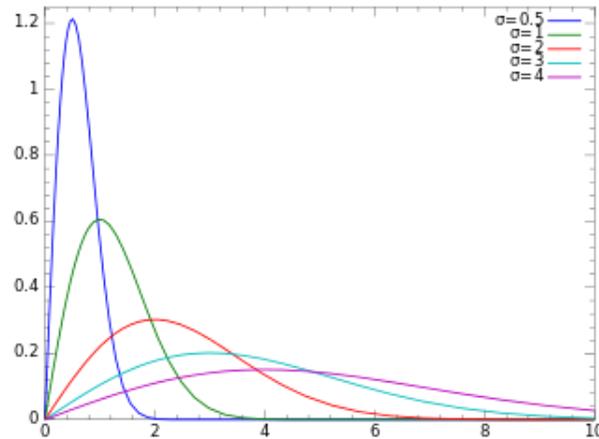


Figura An. 2.2 Función de probabilidad (Rayleigh).

Gracias a la propagación multitrayecto, se consigue obtener cobertura en puntos recónditos, sin embargo, frente a esta ventaja existen ciertos inconvenientes.

Como consecuencia del multitrayecto, para una señal transmitida dada, llegan al receptor numerosas componentes o ecos a través de diferentes caminos con distintas interacciones con los obstáculos interpuestos. Por lo tanto, tales componentes acceden al receptor en tiempos diferentes y con amplitudes y fases aleatorias.



La suma de estas componentes se manifiesta como una onda cuya amplitud presenta amplias y rápidas variaciones de nivel a lo largo del recorrido del móvil, con mínimos que pueden decaer más de 40 dB respecto del valor medio.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] H.J.B. Hans, M. Hiroyuki, "The Smartphone Challenge is Surmountable", Ericsson Corporate Public, vol. 2, Dec. 2011.
 - [2] C. Mannweiler, J. Schneider, A. Klein, "Self-Organizing Network (SON) - Introducing Nokia Siemens Networks SON Suite - an efficient and future-proof platform for SON", Nokia Siemens Networks, 2009.
 - [3] J.A. Valdés, M.P. Muñoz, "Análisis de Interferencia en Femtoceldas para WCDMA", Universidad del Cauca, Sep. 2010.
 - [4] 4G Americas, "Developing and Integrating a High Performance HET-NET", PP. 8, Oct. 2012.
 - [5] 3GPP, ETSI, "TR 143.030 - Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio network planning aspects ", version 11.0.0 Release 11, pp. 9-10, Oct. 2012.
 - [6] Ernesto Apú Picado, "Análisis de las tecnologías de Redes Heterogéneas (HetNet) en los sistemas móviles Estudio caso: Tecnologías lightRadio™", Universidad de Costa Rica, Julio del 2012.
 - [7] 3GPP, ETSI, "TR 125.951 - Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); FDD Base Station (BS) classification ", version 11.0.0 Release 11, pp. 7-11, Oct. 2012.
 - [8] 3GPP, ETSI, "TR 136.931 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) requirements for LTE Pico Node B", version 11.0.0 Release 11, pp. 5-7, Oct. 2012.
 - [9] 3GPP, ETSI, "TS 25.104 - Technical Specification Group Radio Access Network; Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD)", version 9.2.0 Release 9, pp. 10-12, Dic. 2009.
 - [10] J. Zhang, G. de la Roche, "Femtocells : technologies and deployment", John Wiley and Sons, vol. 1, 2010, pp. 1-4, 174-177
-



- [11] 3GPP, ETSI, "TR 136 920- LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); FDD Home eNode B (HeNB) Radio Frequency (RF) requirements analysis", version 11.0.0 Release 11, Oct. 2012.
 - [12] 3GPP, ETSI, "TR 136 921- LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); FDD Home eNode B (HeNB) Radio Frequency (RF) requirements analysis", version 11.0.0 Release 11, Oct. 2012.
 - [13] 3GPP, ETSI, "TR 136 922- LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); TDD Home eNode B (HeNB) Radio Frequency (RF) requirements analysis", version 11.0.0 Release 11, Oct. 2012.
 - [14] Next Generation Mobile Networks, "Small Cell Backhaul Requirements", Version 1, Jun. 2012.
 - [15] Cisco, "The Future of Hotspots: Making Wi-Fi as Secure and Easy to Use as Cellular", 2012.
 - [16] Liu Min, Xu Ruixue, "Broaden Your Way with Resilient WiMAX Network", ZTE, Ene. 2010.
 - [17] 4G Americas, "Developing and Integrating a High Performance HET-NET", PP. 13 - 14, Oct. 2012.
 - [18] Qualcomm, "The 1000x Mobile Data Challenge, More Spectrum, More Small Cells, More Indoor Cells and Higher Efficiency", Oct. 2012.
 - [19] *Uday Mudoj*, "Understanding Small-Cell Unification's Vital Role in LTE And 4G", *Electronic Design*, Ago. 2012.
 - [20] Small Cell Forum, "Small Cell Market Status", Informa Telecoms & Media, pp. 3-6, Dic. 2012.
 - [21] D. Mavrakis, "Small Cell Outnumber Traditional Mobile Base Stations, Informa Telecom & Media, Oct. 2012.
 - [22] R. Reagan, "Small Cell Market Status", Small Cell Forum Ltd, Public Wireless, pp. 7, Feb. 2012.
 - [23] J. Madden, "Cost Comparison Shows the Best Way to Add Capacity", Fierce Broadband Wireless, May. 2012.
-



- [24] S. Saunders, "Small Cells: How Did We Get From Heresy to Prevailing Orthodoxy, and What Challenges Lie Ahead?", Real Wireless, Oct. 2012.
 - [25] A. Fellah, "Small cells will end mobile market's obsession with sub-1GHz spectrum", Fierce Broadband Wireless, Oct. 2012.
 - [26] 4G Americas, "4G Mobile Broadband Evolution 3GPP Release 10 and Beyond", pp. 59-85, Jan. 2012.
 - [27] 4G Americas, "Mobile Broadband Explosion", The 3gpp Wireless Evolution", pp. 106-111, Aug. 2012.
 - [28] H. Beijner, "Hetnets by Ericsson, Seamless User Experience Everywhere", Ericsson AB, abr. 16, 2012.
 - [29] Ericsson ab, "traffic and market report, on the pulse of the networked society", Stockholm, Sweden, Ago. 2012.
 - [30] Ericsson ab, "traffic and market report, on the pulse of the networked society", Stockholm, Sweden, PP. 3, Ago. 2012.
 - [31] ZTE Corporation, "Enhanced ICIC for LTE-A HetNet", 2011.
 - [32] A. Johansson, 'A Methodology for Estimating Cost and Performance of Heterogeneous Wireless Access Networks', PIMRC'07.
 - [33] R. Qingyang Hu, S. Talwar, P. Zong, "Cooperative, Green and Mobile Heterogeneous Wireless Networks", Utah State University, Intel Corporation, Verizon Wireless, Mar. 2011.
 - [34] T. Edler, "Green Base Stations – How to Minimize CO2 Emission in Operator Networks", Ericsson, Bath Base Station Conference 2008.
 - [35] LTE Self-Organising Networks (SON): Network Management Automation for Operational Efficiency, PP. 105, 2012.
 - [36] LTE Self-Organising Networks (SON): Network Management Automation for Operational Efficiency, pp. 357-378, 2012.
 - [37] Federal Communication commission, "cognitive radio technologies", ET Docket No. 03-108. Mar. 2005.
-



- [38] J. Aguilar, A. Navarro, “Radio cognitiva – Estado del arte”, Universidad ICESI, Revista Sistemas y Telemática. Vol.9, Feb. 2011.
 - [39] R. Pressman, "Ingeniería del software, un enfoque práctico", Quinta edición, Mc Graw Hill, 2002.
 - [40] T.Wysocki, H.Zepernick, “Characterization of the indoor radio propagation channel at 2,4GHz”, Journal of Telecommunications and information Technology, 3-4 2000.
 - [41] L.F Pedraza, C.A Hernández, D.M Ballesteros, “Experimental Analysis for a Propagation Model of the Mobile Telephony Militar University”, Universidad Militar, Bogotá, Dic. 2009.
 - [42] R. M. Rius, “Diseño Cooperativo de un Sistema de Comunicaciones por Satélite Basado en Diversidad Espacial”, Universidad Autónoma de Barcelona, Jun. 2008.
 - [43] Rouault, J.-D., and Chéruel, F. “*The Scilab Puffin: a. Naturalist's Wink*”, 2004.
 - [44] C.H.M. De Lima, M. Bennis, M. Latva-aho, "Coordination Mechanisms for Stand-Alone Femtocells in Self-Organizing Deployments", *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE*, vol., no., pp.1-6, 5-9, Dec. 2011.
 - [45] A. de Domenico, R. Mahapatra, S. Mayrargue, E.C. Strinati, M. Maqbool, M. Lalam, M. Shariat, C. Kosta, A.U. Quddus, M. Bennis and C.H.M. De Lima, “Promising Interference and Radio Management Techniques for Indoor Standalone Femtocells”, BeFEMTO, pp. 15-19, Feb. 2012.
 - [46] J.M. Hernando Rábanos, “*Comunicaciones móviles*”, Editorial Centro de estudios Ramón Areces, Madrid.
-