

ANÁLISIS DE INTERFERENCIA EN FEMTOCELDAS PARA WCDMA



María del Pilar Muñoz Arenas
Julián Antonio Valdés Domínguez

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas
Popayán, 2010

ANÁLISIS DE INTERFERENCIA EN FEMTOCELDAS PARA WCDMA



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

**María del Pilar Muñoz Arenas
Julián Antonio Valdés Domínguez**

Director
Ing. Víctor Manuel Quintero Flórez

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas
Popayán, 2010**

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

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.

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



TABLA DE CONTENIDO

1	GENERALIDADES	2
1.1	INTRODUCCION A WCDMA	2
1.1.1	<i>Generalidades sobre WCDMA</i>	5
1.2	ESPECIFICACIONES DE WCDMA	6
1.2.1	<i>Acceso Múltiple</i>	7
1.2.2	<i>Codificación y Multiplexación</i>	8
1.2.3	<i>Modulación</i>	9
1.2.4	<i>Ensanchamiento</i>	10
1.2.5	<i>Aleatorización</i>	12
1.3	ARQUITECTURA DE LA RED WCDMA	13
1.3.1	<i>Equipo de Usuario</i>	13
1.3.2	<i>Red de Acceso Radio Terrestre UMTS</i>	14
1.3.3	<i>Núcleo de Red</i>	15
1.4	CANALES EN WCDMA	16
1.4.1	<i>Canales Lógicos</i>	17
1.4.2	<i>Canales de Transporte</i>	17
1.4.3	<i>Canales Físicos</i>	17
1.5	CELDAS EN SISTEMAS DE TELEFONIA CELULAR	20
1.5.1	<i>Femtoceldas</i>	21
1.5.1.1	<i>Características</i>	22
1.5.1.2	<i>Ventajas</i>	23
1.5.1.3	<i>Especificaciones Técnicas</i>	24
1.5.1.4	<i>Arquitectura de Red</i>	25
2	INTERFERENCIAS SOBRE WCDMA	27
2.1	INTRODUCCIÓN	27
2.2	TIPOS DE INTERFERENCIA EN WCDMA	27
2.2.1	<i>Interferencia Co-Canal</i>	27
2.2.2	<i>Interferencia de Canal Adyacente</i>	28
2.2.3	<i>Efecto Cerca-Lejos</i>	29
2.2.4	<i>Interferencia de Acceso Múltiple</i>	29
2.2.5	<i>Contaminación Piloto</i>	30
2.3	SOLUCIONES A LA INTERFERENCIA	30
2.3.1	<i>Control de Potencia</i>	30
2.3.1.1	<i>Control de Potencia en Lazo Abierto</i>	32
2.3.1.2	<i>Control de Potencia en Lazo Cerrado</i>	32
2.3.2	<i>Detección Multiusuario</i>	36
2.3.3	<i>Control de Admisión</i>	36



2.3.4	Control de Carga (Control de Congestión)	37
2.3.5	Planificador	37
2.3.6	Traspaso de Llamada	37
2.3.6.1	<i>Conjunto Activo</i>	39
2.4	PLANEACIÓN DE COBERTURA Y CAPACIDAD	41
2.4.1	Ecuaciones que determinan la capacidad	42
2.4.1.1	<i>Factor de Carga en el UL</i>	42
2.4.1.2	<i>Factor de Carga en el DL</i>	44
3	MODELOS DE PROPAGACIÓN Y ANÁLISIS DE COBERTURA	46
3.1	INTRODUCCIÓN	46
3.2	MODELOS DE PROPAGACIÓN	46
3.2.1	Clasificación de los Modelos de Propagación	47
3.3	MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA ENTORNOS MICROCELULARES	50
3.3.1	Ambiente Mixto Peatonal	51
3.4	DIMENSIONAMIENTO DE UN RADIOENLACE	52
4	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	59
4.1	INTRODUCCIÓN	59
4.2	METODOLOGÍA DE DESARROLLO	59
4.2.1	Análisis de Requisitos	60
4.2.2	Diseño	61
4.2.2.1	<i>Diagrama del Proceso de Simulación</i>	61
4.2.2.2	<i>Selección de la Herramienta de Simulación</i>	63
4.2.3	Implementación	64
4.2.3.1	<i>Consideraciones de la Simulación</i>	65
4.2.3.1.1	<i>Parámetros del sistema</i>	65
4.2.3.1.2	<i>Consideraciones matemáticas</i>	69
4.2.3.1.3	<i>Escenario de simulación</i>	73
4.2.4	Pruebas	74
4.2.4.1	<i>Plan de Pruebas</i>	74
4.2.4.2	<i>Simulaciones</i>	76
4.2.4.2.1	<i>Escenario 1: Femtocelda</i>	76
4.2.4.2.2	<i>Escenario 2: Microcelda</i>	80
4.2.4.2.3	<i>Escenario 3: Microcelda y femtocelda</i>	84
4.2.4.3	<i>Comparación entre Escenarios a 12.2 Kbps</i>	90
4.2.4.4	<i>Pruebas a Diferentes Velocidades de Transmisión de Datos</i>	91
4.2.4.4.1	<i>Plan de pruebas</i>	91
4.2.4.4.2	<i>Relación capacidad vs cobertura</i>	96
5	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	97
5.1	INTRODUCCIÓN	97
5.2	CONCLUSIONES	97
5.3	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	99



LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1. Mercado celular en el mundo.	3
Figura 1.2. Desarrollo de los estándares de 3G.	5
Figura 1.3. Nivel de potencia de la señal ensanchada.	7
Figura 1.4. Modulación I/Q en el enlace de subida.	9
Figura 1.5. Código de ensanchamiento en la señal mensaje (con un SF de 8).	10
Figura 1.6. Ensanchamiento/Aleatorización.	12
Figura 1.7. Esquema de la red WCDMA.	13
Figura 1.8. Canales en WCDMA.	17
Figura 1.9. Sistemas celulares.	20
Figura 1.10. Diagrama de conexión de una femtocelda.	23
Figura 1.11. Arquitectura de red de una femtocelda.	25
Figura 2.1. Interferencia de canal adyacente para el DL.	28
Figura 2.2. Efecto cerca-lejos sobre una celda.	29
Figura 2.3. Control de potencia en el enlace de subida.	31
Figura 2.4. Control de potencia en lazo cerrado en el UL.	33
Figura 2.5. Algoritmo general del control de potencia de lazo externo.	34
Figura 2.6. Control de potencia de lazo externo.	34
Figura 2.7. Control de potencia de lazo interno en el UL.	35
Figura 2.8. Proceso de <i>soft handover</i>	39
Figura 2.9. Proceso de <i>softer handover</i>	39
Figura 2.10. Algoritmo de <i>soft handover</i>	41
Figura 4.1. Modelo lineal secuencial o de cascada.	60
Figura 4.2. Diagrama de flujo del proceso de simulación.	62
Figura 4.3(a). Escenario de simulación de una microcelda.	73
Figura 4.3(b). Escenario de simulación de la Interacción microcelda-femtocelda.	73
Figura 4.4. Escenario 1 de simulación: femtocelda.	77



Figura 4.5(a). Factor de carga.....	77
Figura 4.5(b). Potencias de transmisión.....	77
Figura 4.5(c). Probabilidad de degradación.	78
Figura 4.5(d). Cobertura en la femtocelda.....	78
Figura 4.6(a). Factor de carga.....	78
Figura 4.6(b). Potencias de transmisión.....	78
Figura 4.6(c). Probabilidad de degradación.	79
Figura 4.6(d). Cobertura en la femtocelda.....	79
Figura 4.7. Factor de carga.	79
Figura 4.8. Escenario 2 de simulación: microcelda.	81
Figura 4.9(a). Factor de carga.....	81
Figura 4.9(b). Potencias de transmisión.....	81
Figura 4.9(c). Probabilidad de degradación.	82
Figura 4.9(d). Cobertura en la microcelda.....	82
Figura 4.10(a). Factor de carga.....	82
Figura 4.10(b). Potencias de transmisión.....	82
Figura 4.10(c). Probabilidad de degradación.	83
Figura 4.10(d). Cobertura en la microcelda.....	83
Figura 4.11. Factor de carga.	83
Figura 4.12. Escenario 3 de simulación: microcelda y femtocelda.....	84
Figura 4.13(a). Factor de carga en la microcelda.	85
Figura 4.13(b). Factor de carga en la femtocelda.....	85
Figura 4.13(c). Potencias de transmisión en la microcelda.	85
Figura 4.13(d). Potencias de transmisión en la femtocelda.....	85
Figura 4.13(e). Probabilidad de degradación del sistema.....	86
Figura 4.13(f). Cobertura del sistema respecto a la microcelda.	86
Figura 4.14(a). Factor de carga en la microcelda.	86
Figura 4.14(b). Factor de carga en la femtocelda.....	86
Figura 4.15(a). Factor de carga en la microcelda.	87
Figura 4.15(b). Factor de carga en la femtocelda.....	87
Figura 4.15(c). Potencias de transmisión en la microcelda.	87



Figura 4.15(d). Potencias de transmisión en la femtocelda.....	87
Figura 4.15(e). Probabilidad de degradación del sistema.....	87
Figura 4.15(f). Cobertura del sistema respecto a la microcelda.	87
Figura 4.16(a). Factor de carga en la microcelda.	88
Figura 4.16(b). Factor de carga en la femtocelda.....	88
Figura 4.16(c). Potencias de transmisión en la microcelda.	88
Figura 4.16(d). Potencias de transmisión en la femtocelda.....	88
Figura 4.16(e). Probabilidad de degradación del sistema.....	89
Figura 4.16(f). Cobertura del sistema respecto a la microcelda.	89



LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1. Especificaciones técnicas de WCDMA.....	6
Tabla 1.2. Velocidades de transmisión de datos en WCDMA.	11
Tabla 1.3. Canales lógicos de WCDMA.	18
Tabla 1.4. Canales de transporte de WCDMA.	18
Tabla 1.5. Canales físicos en WCDMA.	19
Tabla 1.6. Máxima potencia de transmisión UE.	22
Tabla 1.7. Especificaciones técnicas de femtoceldas.	24
Tabla 2.1. Separación entre canales adyacentes.	28
Tabla 2.2. Rango de control de potencia del transmisor.	36
Tabla 2.3. Valores de los parámetros en una transmisión de voz.	45
Tabla 3.1. Balance de enlace de un servicio de voz a 12.2 Kbps.....	56
Tabla 3.2. Distancias máximas de cobertura para diferentes velocidades.....	57
Tabla 3.3. Distancias máximas de cobertura para diferentes factores de carga y diferentes velocidades de transmisión de datos de referencia.....	58
Tabla 4.1. Parámetros indicados para cada velocidad de transmisión.....	67
Tabla 4.2. Parámetros generales del sistema.	67
Tabla 4.3. Parámetros estaciones base (Nodos B).....	68
Tabla 4.4. Parámetros estaciones móviles (UE).	68
Tabla 4.5. Plan de pruebas para una velocidad de transmisión de 12.2 Kbps.....	75
Tabla 4.6. Cuadro comparativo escenario 1.....	80
Tabla 4.7. Cuadro comparativo escenario 2.....	84
Tabla 4.8. Cuadro comparativo escenario 3.....	89
Tabla 4.9. Comparación entre escenarios para 20 usuarios.....	90
Tabla 4.10. Comparación entre escenarios para 47 usuarios.	90
Tabla 4.11. Plan de pruebas para una velocidad de transmisión de 64 Kbps.....	91
Tabla 4.12. Cuadro comparativo para una velocidad de transmisión de datos de 64 Kbps. ...	92
Tabla 4.13. Plan de pruebas para una velocidad de transmisión de 144 Kbps.....	93
Tabla 4.14. Cuadro comparativo para una velocidad de transmisión de datos de 144 Kbps. .	94



Tabla 4.15. Plan de pruebas para una velocidad de transmisión de 384 Kbps..... 94

Tabla 4.16. Cuadro comparativo para una velocidad de transmisión de datos de 384 Kbps. . 95

Tabla 4.17. Cuadro comparativo para diferentes velocidades de transmisión de datos 96



LISTADO DE ACRÓNIMOS

1G	Primera Generación (<i>First Generation</i>).
2G	Segunda Generación (<i>Second Generation</i>).
3G	Tercera Generación (<i>Third Generation</i>).
3GPP	Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (<i>3rd Generation Partnership Project</i>).
ACI	Interferencia de Canal Adyacente (<i>Adjacent Channel Interference</i>).
AICH	Canal de Adquisición de Indicadores (<i>Acquisition Indicator Channel</i>).
AMPS	Sistema Telefónico Móvil Avanzado (<i>Advanced Mobile Phone System</i>).
AMR	Multitasa Adaptativa (<i>Adaptative Multirate</i>).
AP	Punto de Acceso (<i>Access Point</i>).
AWGN	Canal de Ruido Gaussiano Blanco Aditivo (<i>Additive White Gaussian Noise</i>).
BCCH	Canal de Control de Difusión (<i>Broadcast Control Channel</i>).
BCH	Canal de Difusión (<i>Broadcast Channel</i>).
BER	Tasa de Bits Errados (<i>Bit Error Rate</i>).
BLER	Tasa de Error de Bloque (<i>Block Error Rate</i>).
BPSK	Modulación por Desplazamiento de Fase Binario (<i>Binary Phase Shift Keying</i>).
BS	Estación Base (<i>Base Station</i>).
CCCH	Canal de Control Común (<i>Common Control Channel</i>).
CCI	Interferencia Co-Canal (<i>Co-Channel Interference</i>).



CCTrCH	Transporte de Código Compuesto (<i>Coded Composite Transport Channel</i>).
CDMA	Acceso Múltiple por División de Código (<i>Code Division Multiple Access</i>).
CIR	Relación Portadora a Interferencia (<i>Carrier to Interference Ratio</i>).
CN	Núcleo de Red (<i>Core Network</i>).
CPCH	Canal de Paquetes Común (<i>Common Packet Channel</i>).
CPICH	Canal Piloto Común (<i>Common Pilot Channel</i>).
CRC	Verificación de Redundancia Cíclica (<i>Cyclic Redundancy Check</i>).
CS	Conmutación de Circuitos (<i>Circuit Switching</i>).
CTCH	Canal de Tráfico Común (<i>Common Traffic Channel</i>).
DCCH	Canal de Control Dedicado (<i>Dedicated Control Channel</i>).
DCH	Canal Dedicado (<i>Dedicated Channel</i>).
DL	Enlace de Bajada (<i>Downlink</i>).
DPCCH	Canal Físico de Control Dedicado (<i>Dedicated Physical Control Channel</i>).
DPDCH	Canal Físico de Datos Dedicado (<i>Dedicated Physical Data Channel</i>).
DQPSK	Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Diferencial (<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i>).
DS	Secuencia Directa (<i>Direct Sequence</i>).
DS-CDMA	Acceso Múltiple por División de Código por Secuencia Directa (<i>Direct Sequence Code Division Multiple Access</i>).
DSCH	Canal Compartido en el Enlace de Bajada (<i>Downlink Shared Channel</i>).
DSL	Línea de Abonado Digital (<i>Digital Subscriber Line</i>).
DSSS	Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>).
DTCH	Canal de Tráfico Dedicado (<i>Dedicated Traffic Channel</i>).
DTX	Transmisión Discontinua (<i>Discontinuous Transmission</i>).



EDGE	Tasas de Datos Mejoradas para la Evolución de GSM (<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i>).
EIRP	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (<i>Equivalent Isotropic Radiated Power</i>).
ETSI	Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo (<i>European Telecommunications Standards Institute</i>).
FACH	Canal de Acceso hacia Adelante (<i>Forward Access Channel</i>).
FDD	Duplexación por División de Frecuencia (<i>Frequency Division Duplex</i>).
FDMA	Acceso al Medio por División Frecuencia (<i>Frequency Division Multiple Access</i>).
FM	Modulación en Frecuencia (<i>Frequency Modulation</i>).
FPLMTS	Sistemas de Telecomunicaciones Móviles Terrestres Públicas Futuras (<i>Future Public Land Mobile Telecommunications System</i>).
GGSN	Pasarela Nodo de Soporte GPRS (<i>Gateway GPRS Support Node</i>).
GMSC	Pasarela Centro de Conmutación Móvil (<i>Gateway Mobile Switching Center</i>).
GMSK	Desplazamiento Mínimo Gaussiano (<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i>).
GPRS	Servicio General de Radio por Paquetes (<i>General Packet Radio Service</i>).
GSM	Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (<i>Global System for Mobile Communications</i>).
GTD	Teoría Geométrica de la Difracción (<i>Geometric Theory of Diffraction</i>).
HLR	Registro de Usuarios Locales (<i>Home Local Register</i>).
HNB	Nodo B de Hogar (<i>Home Node B</i>).
HNB-GW	Pasarela de Nodo B de Hogar (<i>Home Node B Gateway</i>).
HPSK	Modulación por Desplazamiento de Fase Híbrido (<i>Hybrid Phase Shift Keying</i>).
HSDPA	Acceso a Paquetes en Enlace de Bajada de Alta Velocidad (<i>High-Speed Downlink Packet Access</i>).
IM	Margen de Interferencia (<i>Interference Margin</i>).
IMT-2000	Telecomunicaciones Móviles Internacionales para el año 2000 (<i>International Mobile Telecommunications-2000</i>).



INRIA	Instituto Nacional de Investigación en Informática y Automática (<i>Institut National de Recherche en Informatique et Automatique</i>).
IP	Protocolo Internet (<i>Internet Protocol</i>).
ISDN	Red Digital de Servicios Integrados (<i>Integrated Services Digital Network</i>).
ISI	Interferencia Intersimbólica (<i>Inter-symbol Interference</i>).
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones (<i>International Telecommunications Union</i>).
Iu CS	Interfaz Iu por Conmutación de Circuitos (<i>Iu Circuit Switched</i>).
Iu PS	Interfaz Iu por Conmutación de Paquetes (<i>Iu Packet Switched</i>).
IWF	Función de Interoperabilidad (<i>Inter-Working Function</i>).
LBS	Servicios Basados en Localización (<i>Location Based Services</i>).
LOS	Línea de Vista (<i>Line of Sight</i>).
MAC	Control de Acceso al Medio (<i>Medium Access Control</i>).
MAI	Interferencia de Acceso Múltiple (<i>Multiple Access interference</i>).
MAPL	Máximas Pérdidas de Trayecto Permitidas (<i>Maximum Allowed Propagation Loss</i>).
ME	Equipo Móvil (<i>Mobile Equipment</i>).
MIMO	Sistema de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (<i>Multiple Input – Multiple Output</i>).
MMS	Sistema de Mensajería Multimedia (<i>Multimedia Messaging System</i>).
MSC	Centro de Conmutación Móvil (<i>Mobile Switching Center</i>).
MUD	Detección Multiusuario (<i>Multiuser Detection</i>).
NF	Figura de Ruido (<i>Noise Figure</i>).
NLOS	No Línea de Vista (<i>No Line of Sight</i>).
NMT	Telefonía Móvil Nórdica (<i>Nordic Mobile Telephone</i>).



OCQPSK	Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Ortogonal Compleja (<i>Orthogonal Complex Quadrature Phase Shift Keying</i>).
PCCH	Canal de Control de Notificación (<i>Paging Control Channel</i>).
PCCPCH	Canal Físico Primario de Control Común (<i>Primary Common Control Physical Channel</i>).
PCH	Canal de Notificación (<i>Paging Channel</i>).
PCPCH	Canal Físico de Paquetes Común (<i>Physical Common Packet Channel</i>).
PDN	Red Pública de Datos (<i>Public Data Network</i>).
PDP	Protocolo de Paquetes de Datos (<i>Packet Data Protocol</i>).
PDS	Sistema Digital Personal (<i>Personal Digital System</i>).
PDSCH	Canal Físico Compartido en el Enlace de Bajada (<i>Physical Downlink Shared Channel</i>).
PG	Ganancia de Procesamiento (<i>Processing Gain</i>).
PLMN	Red Móvil Terrestre Pública (<i>Public Land Mobile Network</i>).
PN	Pseudo-Ruido (<i>Pseudo-Noise</i>).
PRACH	Canal Físico de Acceso Aleatorio (<i>Physical Random Access Channel</i>).
PS	Conmutación de Paquetes (<i>Packet Switching</i>).
PSTN	Red Telefónica Pública Conmutada (<i>Public Switched Telephone Network</i>).
QoS	Calidad de Servicio (<i>Quality of Service</i>).
QPSK	Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>).
RACH	Canal de Acceso Aleatorio (<i>Random Access Channel</i>).
RLC	Control del Enlace Radio (<i>Radio Link Control</i>).
RNC	Controlador de Red Radio (<i>Radio Network Controller</i>).
RNS	Sub-sistema de Red Radio (<i>Radio Network Sub-system</i>).



RRC	Filtro de Raíz de Coseno Alzado (<i>Root-Raised Cosine Filter</i>).
RRM	Gestión de Recursos Radio (<i>Radio Resource Management</i>).
RTT	Tecnología de Transmisión Radio (<i>Radio Transmission Technology</i>).
SCCPCH	Canal Físico Secundario de Control Común (<i>Secondary Common Control Physical Channel</i>).
SCH	Canal de Sincronización (<i>Synchronization Channel</i>).
SeGW	Pasarela de Seguridad (<i>Security Gateway</i>).
SF	Factor de Ensanchamiento (<i>Spreading Factor</i>).
SGSN	Nodo de Soporte al Servicio GPRS (<i>Serving GPRS Support Node</i>).
SHO	Trasposos Suaves (<i>Soft Handover</i>).
SIM	Modulo de Identificación del Subscriptor (<i>Subscriber Identity Module</i>).
SIR	Relación Señal a Interferencia (<i>Signal to Noise Ratio</i>).
SMS	Servicio de Mensajes Cortos (<i>Short Message Service</i>).
SS	Espectro Ensanchado (<i>Spread Spectrum</i>).
TACS	Sistema de Comunicación de Acceso Total (<i>Total Access Communication System</i>).
TBS	Conjuntos de Bloques de Transporte (<i>Transport Block Set</i>).
TDD	Duplexación por División de Tiempo (<i>Time Division Duplex</i>).
TDMA	Acceso Múltiple por División de Tiempo (<i>Time Division Multiple Access</i>).
TFCI	Indicador Combinado de Formato de Transporte (<i>Transport Format Combination Indicator</i>).
TFI	Indicador de Formato de Transporte (<i>Transport Format Indicator</i>).
TIA	Asociación de Industrias de las Telecomunicaciones (<i>Telecommunications Industry Association</i>).
TPC	Control de Potencia de Transmisión (<i>Transmit Power Control</i>).



TrCH	Canales de Transporte (<i>Transport Channels</i>).
TTI	Intervalo de Tiempo de Transmisión (<i>Transmission Time Interval</i>).
UAG	Pasarela de Acceso Universal (<i>Universal Access Gateway</i>).
UE	Equipo de Usuario (<i>User Equipment</i>).
UL	Enlace de Subida (<i>Uplink</i>).
UMTS	Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>).
USIM	Modulo de Identificación del Subscriptor UMTS (<i>UMTS Subscriber Identity Module</i>).
UTRAN	Red de Acceso Radio Terrestre UMTS (<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>).
VLR	Registro de Usuarios Visitantes (<i>Visitor Location Register</i>).
VOD	Video Bajo Demanda (<i>Video on Demand</i>).
VoIP	Voz sobre IP (<i>Voice over IP</i>).
WCDMA	Acceso Múltiple por División de Código de Banda ancha (<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>).



INTRODUCCIÓN

Debido al continuo crecimiento de las comunicaciones inalámbricas y a la constante demanda de sistemas que brinden mayor capacidad, cobertura y permitan prestar todo tipo de servicios, se han venido desarrollando tecnologías que suplen dichas necesidades, entre ellas las femtoceldas, las cuales ofrecen ventajas técnicas y económicas en el momento de utilizarse como “puntos de acceso radio 3G”, mejorando las conexiones de móviles para ambientes interiores y reforzando la cobertura local.

El funcionamiento de las femtoceldas se aplica sobre cualquier tecnología de comunicación móvil e inalámbrica, tal como el Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha (WCDMA, *Wideband Code Division Multiple Access*), tecnología de acceso al medio que brinda altas velocidades de transmisión de datos, la cual se ve considerablemente afectada por la interferencia de banda ancha generada por llamadas activas, limitando la capacidad y cobertura del sistema.

En el presente trabajo de grado se desarrolla una simulación básica estática a nivel de sistema que presenta un algoritmo de control de potencia, mediante el cual se analizó el desempeño de un sistema WCDMA, en términos de capacidad y cobertura, aplicado para el enlace de subida. El estudio se realizó sobre un entorno microcelular urbano para un sistema gobernado por el estándar WCDMA en donde interactúa una microcelda con una femtocelda, evaluando las características de limitación por interferencia que sufren estos sistemas de tercera generación (3G), donde la estimación de la potencia transmitida juega un papel fundamental en el momento de satisfacer los objetivos de calidad requeridos por cada uno de los usuarios que establecen una comunicación.

El presente documento se encuentra estructurado en cinco capítulos. El primer capítulo presenta una descripción general de la tecnología WCDMA y sus características fundamentales, además incluye una descripción de las femtoceldas como puntos de acceso radio de tercera generación. En el segundo capítulo se estudian los diferentes tipos de interferencia que afectan la comunicación inalámbrica sobre WCDMA, y los distintos métodos que permiten solucionar dichas interferencias. En el tercer capítulo se selecciona el modelo de propagación a aplicar, y se determina de manera general los efectos de la carga sobre la cobertura del sistema. El cuarto capítulo muestra el diseño y la implementación de una simulación a nivel de sistema que permite visualizar los efectos de la interferencia sobre la capacidad y cobertura de un sistema WCDMA, para luego analizar los resultados obtenidos. Finalmente, en el quinto capítulo se resumen las conclusiones y se plantean posibles líneas futuras de investigación.



1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCION A WCDMA

Las comunicaciones móviles en su evolución han pasado de ser un lujo a una necesidad en las actividades diarias de los seres humanos. Los teléfonos celulares se han convertido en una herramienta esencial en las actividades diarias del común de la gente.

La telefonía celular se concibe como un sistema que permite hacer reuso de frecuencias a una cierta distancia, dada la propiedad de las ondas electromagnéticas de atenuarse con la distancia y con ello incrementar la capacidad del número de canales disponibles para el servicio de voz, en comparación con los sistemas de radiocomunicaciones convencionales. Hoy en día la telefonía móvil celular brinda una alta cobertura y capacidad a nivel mundial a través de distintas tecnologías, ofreciendo servicios de datos, audio, video, entre otros, con calidad. En la figura 1.1 [1] se puede observar la evolución de los sistemas de comunicación móvil celular a través de distintas tecnologías y estándares desarrollados a nivel mundial a partir de la Segunda Generación (2G, *Second Generation*) [1].

Las redes celulares de Primera Generación (1G, *First Generation*) se basaron en sistemas analógicos que usan el método Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA, *Frequency Division Multiple Access*), Duplexación por División de Frecuencia (FDD, *Frequency Division Duplexing*), Modulación en Frecuencia (FM, *Frequency Modulation*), y conmutación de circuitos. Los sistemas de 1G fueron diseñados para comunicaciones de voz, usando una transmisión y recepción continua. Estos sistemas son de baja capacidad y muy buena calidad. Los teléfonos celulares representativos de esta generación eran caros, de gran tamaño y peso y alto consumo de energía (corta duración de la batería). La tecnología predominante de esta generación fue el Sistema Telefónico Móvil Avanzado (AMPS, *Advanced Mobile Phone System*) [2]; otras tecnologías que se usaron en 1G fueron: el Sistema de Comunicación de Acceso Total (TACS, *Total Access Communication System*) utilizado principalmente en Inglaterra y la Telefonía Móvil Nórdica (NMT, *Nordic Mobile Telephone*) que se utilizó en Finlandia, Suecia, Noruega y Dinamarca.

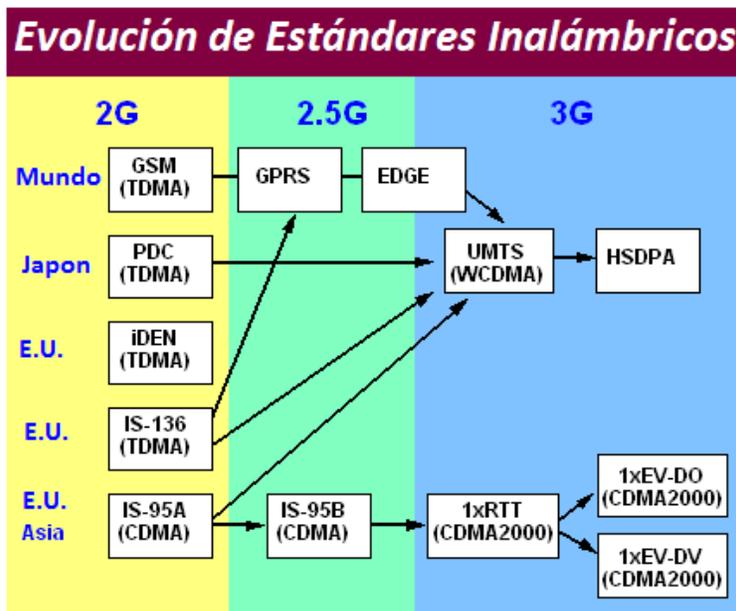


Figura 1.1. Mercado celular en el mundo.

Con el rápido incremento en el número de subscriptores de voz fue necesaria una nueva tecnología de transmisión que brindara mayor capacidad y permitiera utilizar de manera eficiente los recursos disponibles. La 2G al igual que la 1G fue pensada para comunicaciones de voz, basándose en sistemas digitales usando FDMA/TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo, *Time Division Multiple Access*), conmutación de circuitos, Duplexación por División de Frecuencia (FDD) y métodos de modulación digital. En la 2G se incrementó la capacidad del canal de control. Por otro lado los teléfonos celulares redujeron su tamaño, peso y consumo de energía, esto último favorecido al no transmitir y recibir de forma continua, sino en ciertos intervalos de tiempo [2]. Una de las tecnologías 2G es TDMA/IS-136, en donde se utiliza canales de 30 KHz, cada uno de los cuales es compartido en el tiempo por tres usuarios, lo que triplica la capacidad del sistema en comparación con la tecnología predecesora AMPS. IS-136 ofrece servicios como el Servicio de Mensajes Cortos (SMS, *Short Message Service*), fax y transmisiones de datos con velocidades de hasta 9.6 Kbps. IS-136 utiliza Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Diferencial ($\pi/4$ -DQPSK, $\pi/4$ *Differential Quadrature Phase Shift Keying*). Sin embargo, la tecnología predominante en 2G, debido al desarrollo, estandarización y gran aceptación, es el Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (GSM, *Global System for Mobile Communications*) definido por el Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*). GSM define un espaciamiento entre portadoras o canales de 200 KHz, cada uno de los cuales es compartido en el tiempo por 8 usuarios. GSM utiliza Modulación por Desplazamiento Mínimo Gaussiano (GMSK, *Gaussian Minimum Shift Keying*). GSM ofrece servicios de transmisión de voz, SMS y transmisión de datos alcanzando velocidades de hasta de 9.6 Kbps por canal [3].



En la evolución de GSM han surgido tecnologías como el Servicio General de Radio por Paquetes (GPRS, *General Packet Radio Service*) o Velocidades de Transmisión de Datos Mejoradas para la Evolución de GSM (EDGE, *Enhanced Data Rates for GSM Evolution*), las que han sido denominadas tecnologías 2.5G y 2.75G respectivamente, las cuales mejoran las velocidades de transmisión de datos, permitiendo lograr velocidades de hasta 115 Kbps para GPRS y de 384 Kbps para EDGE, para ofrecer servicios por conmutación de paquetes, tales como los servicios de transmisión de datos y acceso a Internet [1].

Se debe tener en cuenta que la conmutación de circuitos es más adecuada para servicios como la voz, donde el tráfico es continuo. Por otro lado los servicios de datos manejan un tráfico tipo ráfaga¹ (*burst*), ajustándose mejor a la conmutación de paquetes. Debido al carácter tipo ráfaga de los servicios de datos, la conmutación de circuitos no es la más adecuada para brindar este tipo de servicios, al cobrar por el tiempo de conexión y no por la cantidad de información, lo que hace que el servicio para el usuario sea mucho más costoso.

Otra tecnología 2G fue CDMA/IS-95 o CDMAOne la cual se basa en la técnica de transmisión de Espectro Ensanchado (SS, *Spread Spectrum*) empleando Acceso Múltiple por División de Código (CDMA, *Code Division Multiple Access*), donde se le asigna un código ortogonal único a cada comunicación, teniendo un espaciamiento entre portadoras o ancho de canal de 1.25 MHz para servicios de voz y datos, y alcanzando velocidades de transmisión de datos de hasta 14.4 Kbps por canal para brindar servicios como SMS y acceso a Internet.

La gran aceptación y popularidad de GSM a nivel mundial fue debida principalmente por el enorme apoyo que obtuvo desde el marco regulatorio europeo. Con la aparición de internet, los usuarios exigieron nuevos y mejores servicios en comunicación de datos, los cuales no pueden ser ofrecidos con una alta eficiencia por las tecnologías de 2G.

La Tercera Generación (3G, *Third Generation*) de sistemas de comunicación móvil tiene como propósito brindar soporte a los nuevos servicios que exigen en ciertos casos altas velocidades de transmisión de datos como: acceso a internet, video llamada, Sistema de Mensajería Multimedia (MMS, *Multimedia Messaging System*), Video Bajo Demanda (VOD, *Video On Demand*), Servicios Basados en Localización (LBS, *Location Based Services*), *streaming*² de video y audio, entre otros. Estos servicios exigían mayores capacidades de las redes existentes en ese momento, razón por la cual la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunications Union*), el ETSI y otras organizaciones de estandarización participaron en la definición de un Sistema de Telecomunicaciones Móviles Terrestres Públicas del Futuro (FPLMTS, *Future*

¹ El tráfico tipo ráfaga o *Bursty* se refiere a la transmisión de información de manera intermitente durante una conexión, en forma de mensajes individuales. Los mensajes son ráfagas cortas de datos que se envían a intervalos aleatorios [3].

² La tecnología de *Streaming* se utiliza para facilitar la descarga y reproducción de audio y vídeo sobre la web, ya que permite escuchar y visualizar los archivos mientras se están descargando [3].



Public Land Mobile Telecommunications System), proyecto denominado Telecomunicaciones Móviles Internacionales para el año 2000 (IMT-2000, *International Mobile Telecommunications-2000*) [3]. El objetivo de este proyecto era definir una única tecnología de comunicación móvil celular a nivel mundial.

La ITU denominó como Tecnología de Transmisión Radio (RTT, *Radio Transmission Technology*) a las tecnologías propuestas como interfaces radio para sistemas 3G. Las RTT propuestas se muestran en la figura 1.2 [1], dentro de las cuales se encuentra WCDMA en modo FDD que será la tecnología analizada en este trabajo de grado.

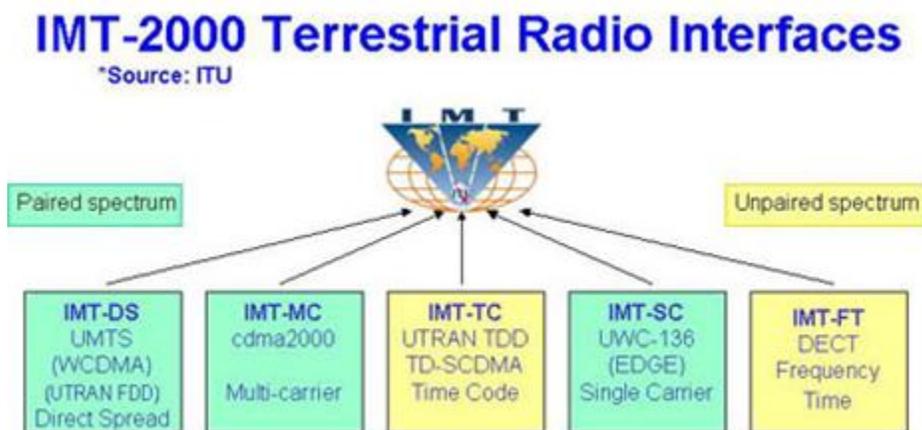


Figura 1.2. Desarrollo de los estándares de 3G.

1.1.1 Generalidades sobre WCDMA

WCDMA es la tecnología de acceso al medio utilizada por el Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS³, *Universal Mobile Telecommunication System*), como interfaz radio para permitir el acceso de los usuarios móviles a la red fija. WCDMA es una tecnología inalámbrica que brinda altas velocidades de transmisión de datos, soportando comunicaciones de voz y datos, incluyendo comunicaciones multimedia [4] [5].

El funcionamiento de WCDMA se basa en la técnica de espectro ensanchado (SS) [6] [7], donde se emplea la división de código como método de acceso denominado CDMA de Secuencia Directa (DS-CDMA, *Direct Sequence CDMA*) [8] [9], en el cual cada señal se codifica o identifica con un único código ortogonal⁴, que no interfiere con las señales de los otros usuarios que se encuentran en la misma frecuencia y ancho de banda de canal, permitiendo un reuso de frecuencias igual a 1. Se denomina espectro ensanchado debido

³ UMTS es el nombre del estándar europeo para sistemas inalámbricos 3G, mientras que WCDMA es el nombre de su interfaz radio, pero el constante uso de estas siglas ha hecho que se consideren sinónimos. UMTS es el nombre que predomina en Europa, mientras que WCDMA es el nombre con que se conoce esta tecnología en América.

⁴ El término ortogonalidad es una generalización de la noción geométrica de perpendicularidad. En el espacio en el espacio euclídeo convencional el término ortogonal y el término perpendicular son sinónimos [10].



a que el espectro de la señal de información se dispersa sobre un ancho de banda mayor, por medio de la multiplicación en el dominio del tiempo de la señal de información por una secuencia de código pseudo-aleatoria, única para cada usuario [8] [9].

1.2 ESPECIFICACIONES DE WCDMA

En la tabla 1.1 se resumen las especificaciones generales de WCDMA.

Tabla 1.1. Especificaciones técnicas de WCDMA.

Característica	Especificación
Esquema de Acceso Múltiple	DS-CDMA.
Esquema de Duplexación	FDD/TDD.
Ancho de Banda de Portadora	Modo FDD: 5 MHz. Modo TDD: 5 MHz/1.66 MHz.
Tasa de Chip	Modo FDD: 3.84 Mcps. Modo TDD: 3.84 Mcps/1.28 Mcps.
Longitud de Trama	Modo FDD: Duración 10 ms, dividida en 15 ranuras, con una duración por ranura de 0.667 ms. Modo TDD: Duración 10ms, divide en 15 o 14 ranuras, con una duración por ranura de 0.667 ms o 0.714 ms respectivamente.
Factor de Ensanchamiento	Enlace de subida: entre 4 y 256. Enlace de bajada: entre 4 y 512.
Esquema de Multivelocidad	Uso de multicódigo y factor de ensanchamiento variable.
Multiplexación de Servicios	Multiplexación en una única conexión de varios servicios con requerimientos de calidad diferentes.
Detección	Coherente, para lo cual utiliza símbolos pilotos.
Modulación	Enlace de subida: BPSK. Enlace de bajada: QPSK.
Codificación de Canal	Convolutacional y Turbo.
Codificación de Fuente	AMR (para voz).

1.2.1 Acceso Múltiple

CDMA se emplea en comunicaciones inalámbricas y permite compartir el medio de transmisión entre varios usuarios que desean comunicarse simultáneamente, actuando como el método de organización que evita las interferencias mediante esquemas especiales de codificación. El esquema de acceso empleado en WCDMA está basado en la técnica de transmisión de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*) conocida también como DS-CDMA [7] [8], en el cual las señales generadas con esta técnica de transmisión se obtienen multiplicando la señal de información de cada estación móvil con una secuencia pseudoaleatoria o de Pseudo-Ruido (PN, *Pseudo-Noise*) de pulsos binarios o chips, con propiedades similares a las del ruido, definida como código de ensanchamiento o código de canalización de banda ancha, el cual es conocido sólo por las partes involucradas en la comunicación: transmisor y receptor, de tal manera que sólo este último descifre la información contenida en la señal ensanchada.

Las señales obtenidas en el proceso de ensanchamiento tienen un bajo nivel de potencia, por debajo del nivel de ruido, como se observa en la figura 1.3 [11], aspecto que ofrece robustez y le brinda a la señal una baja probabilidad de interceptación y bloqueo [8] [9], objetivos fundamentales que impulsaron la implementación de la técnica de espectro ensanchado (SS) [10] [12], cuyo origen se remonta hacia finales de la Segunda Guerra Mundial para aplicaciones militares, como resultado de un periodo en el cual la tecnología basaba su desarrollo en contrarrestar las tácticas de interceptación e interferencia intencional de señales (*jamming*), con el fin de ocultar las comunicaciones. En 1989 este concepto se llevó al campo comercial [13].

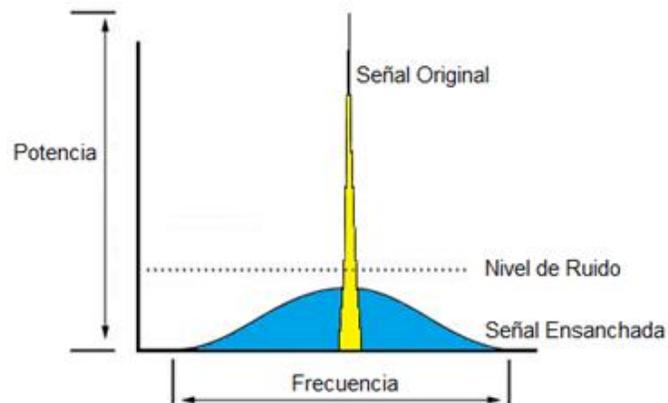


Figura 1.3. Nivel de potencia de la señal ensanchada.

En WCDMA se consideran procesos que conllevan a la transformación de la señal mensaje en una señal digital de alta velocidad de espectro ensanchado, la cual en conjunto con la información de señalización y control del sistema, será enviada a través del canal correspondiente, en este caso por medio de la interfaz radio. Dichos procesos son: codificación y multiplexación, modulación, ensanchamiento (*spreading*) y aleatorización (*scrambling*).



1.2.2 Codificación y Multiplexación

La codificación de canal es el proceso en el cual se añaden bits de redundancia a los canales de transporte [14], con el fin de detectar y/o corregir posibles errores en recepción. La codificación de canal en WCDMA mejora la Tasa de Bits Errados (BER, *Bit Error Rate*) en recepción.

WCDMA usa la Verificación de Redundancia Cíclica (CRC, *Cyclic Redundancy Check*) como método para detectar errores de los bloques de transporte en recepción. El CRC maneja cinco distintos valores: 0, 8, 12, 16 o 24 bits [14]. El CRC tiene una mayor probabilidad de detectar errores en el bloque de transporte, si maneja un valor de redundancia alto [10].

En WCDMA dos métodos de codificación de canal se han definido con el propósito de detectar y corregir errores: convolucional y turbo.

La codificación convolucional se usa generalmente para bajas velocidades de transmisión de datos, de hasta 504 bits de entrada por Intervalo de Tiempo de Transmisión (TTI, *Transmission Time Interval*)⁵, como las presentadas en 2G. Los códigos convolucionales manejan tasas de codificación de 1/2 y 1/3, lo que implica que por bit de entrada al codificador, salen dos o tres bits de salida respectivamente [16].

La codificación turbo maneja tasa de codificación de 1/3 y tiene un gran desempeño con servicios que manejan bloques de transporte de datos de entrada de gran tamaño, entre 40 y 5114 bits por TTI [14], ya que puede trabajar muy cerca del límite definido por el teorema de Shannon⁶, sin embargo el desempeño es bajo para servicios con bloques de datos de tamaño pequeño.

Los procesos de codificación se aplican a los Canales de Transporte (TrCH, *Transport Channels*), normalmente al Canal de Control Dedicado (DCCH, *Dedicated Control Channel*) y al Canal de Tráfico Dedicado (DTCH, *Dedicated Traffic Channel*), los cuales manejan los datos del usuario y los datos de control y señalización de niveles superiores respectivamente. Después de ser codificados los dos TrCH, son multiplexados formando

⁵ El TTI, es un parámetro en WCDMA (UMTS) relacionado con la medida de los bloques de datos provenientes de los niveles superiores de red al nivel de enlace radio. También se define como el tiempo de llegada entre Conjuntos de Bloques de Transporte (TBS, *Transport Block Set*), y es igual a la periodicidad en la cual un TBS es transferido por el nivel físico sobre la interfaz radio. El subnivel MAC entrega un TBS al nivel físico cada TTI. En el *Release '99* el TTI más corto es de 10ms y puede ser 20 ms, 40 ms, o 80 ms. En el *Release-5* el valor de TTI para la tecnología de Acceso a Paquetes en Enlace de Bajada de Alta Velocidad (HSDPA, *High-Speed Downlink Packet Access*) se reduce a 2 ms [5].

⁶ El teorema de Shannon define que la máxima capacidad de un canal puede ser determinada a partir de la siguiente ecuación:

$$C = W \log_2(1 + s/n)$$

Donde C es la capacidad del canal (bps), W es el ancho de banda del canal (Hz), S es la potencia de la señal (W) y N es la potencia del ruido (W) [11].



el Canal de Transporte de Código Compuesto (CCTrCH, *Coded Composite Transport Channel*) [14], el cual se mapea a nivel físico como Canal Físico de Datos Dedicado (DPDCH, *Dedicated Physical Data Channel*), que maneja toda la información de usuario.

Del mismo modo, WCDMA maneja una codificación de fuente para voz, la técnica de Multitasa Adaptativa (AMR, *Adaptative Multirate*) usa un esquema de codificación robusto eliminando considerablemente la redundancia y ofreciendo una buena calidad sobre canales con condiciones pobres [10].

1.2.3 Modulación

Un esquema de modulación de datos define técnicas de cómo los bits de información afectan la amplitud, frecuencia o fase de una señal portadora, que por sus características puede viajar a través del canal de comunicaciones, transportando la información de manera eficiente.

La modulación en el enlace de subida busca maximizar la eficiencia del amplificador de potencia y minimizar la interferencia audible generada por el terminal en audífonos para sordos. El Canal Físico de Datos Dedicado (DPDCH, *Dedicated Physical Data Channel*) y el Canal Físico de Control Dedicado (DPCCH, *Dedicated Physical Control Channel*) son multiplexados con codificación I/Q (no en el tiempo), es decir, el DPDCH es transmitido a través de la rama I (componente real) del modulador, mientras que el DPCCH solo es transmitido a través de la rama Q (componente compleja), la modulación en el enlace de subida se muestra en la figura 1.4 [10], donde G denota el factor de ganancia relativa entre el DPDCH y el DPCCH [17].

La modulación usada para el enlace de bajada es QPSK, donde los canales dedicados de datos y control son combinados (multiplexados) en el tiempo [10], ambos canales manejan niveles iguales de potencia en los ejes I y Q, dado que en el enlace de bajada la transmisión es continua.

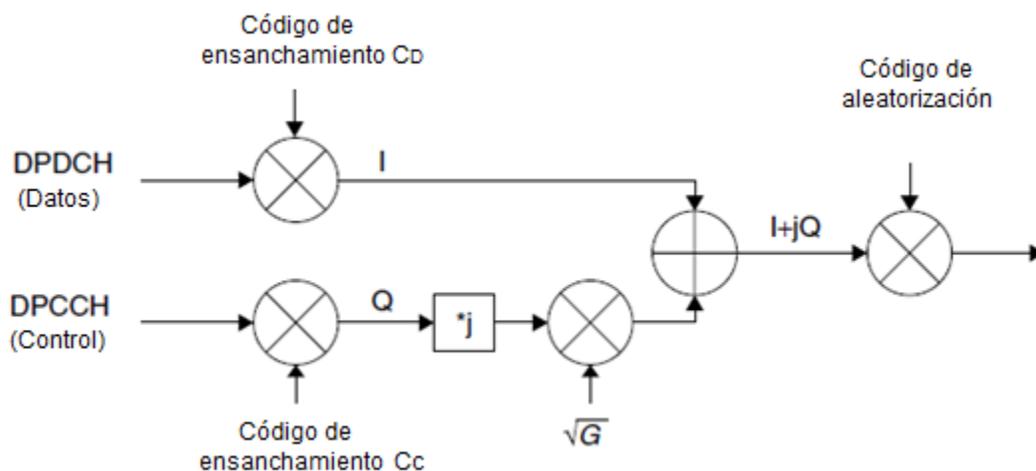


Figura 1.4. Modulación I/Q en el enlace de subida.



1.2.4 Ensanchamiento

El proceso de ensanchamiento (Spreading) es el que convierte a la señal de información en una señal de alta velocidad o de espectro ensanchado, al codificarla con un código de canalización que incluye un número determinado de chips por símbolo de la señal de información, lo que representa el Factor de Ensanchamiento (SF, *Spreading Factor*).

El factor de ensanchamiento se define como la ganancia que se obtiene en el proceso de ensanchamiento/desensanchamiento de la señal de información. Este Factor se conoce también como Ganancia de Procesamiento (PG, *Processing Gain*) [9]. Un SF igual a 4 representa que un símbolo de la señal de información se representará por 4 chips en el momento de ensanchar la señal de información o señal de datos [8] [9]. El valor del factor de ensanchamiento se determina a partir de las ecuaciones 1.1 y 1.2.

$$SF = PG = \frac{\text{Tasa de Chip}}{\text{Tasa de Bit}} \quad (1.1)$$

$$SF[dB] = PG[dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{Tasa de Chip}}{\text{Tasa de Bit}} \right) \quad (1.2)$$

Cada código de canalización se compone por un número específico de chips cuyos valores varían entre 1 y -1, como lo hace también la señal mensaje, creando una secuencia que se asigna a cada símbolo de esta última [9], además es diseñado de manera que sea único para cada usuario. Este proceso se muestra en la figura 1.5 [10].

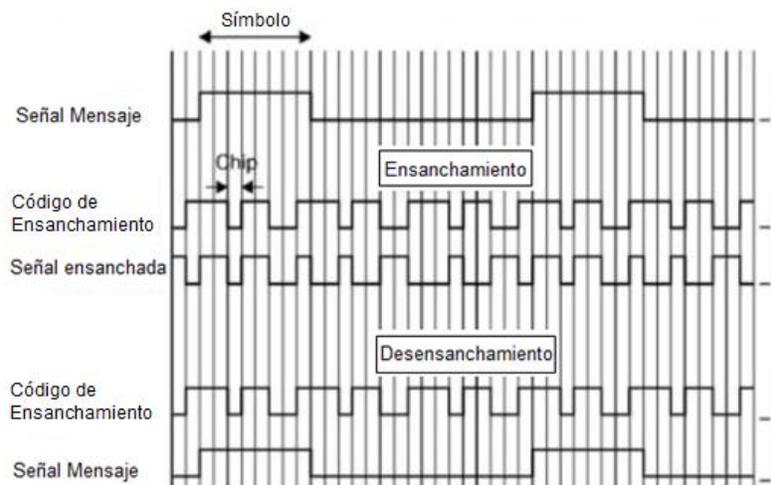


Figura 1.5. Código de ensanchamiento en la señal mensaje (con un SF de 8).

La velocidad de la señal ensanchada es mucho mayor que la de la señal mensaje en banda base, lo que la relaciona a un ancho de banda mayor. En el caso de WCDMA, con un ancho de banda de portadora de 5 MHz, se ofrecen velocidades de transmisión de datos de hasta 2 Mbps. Aunque WCDMA fue desarrollada para soportar velocidades que permiten aplicaciones como navegación en internet, video-llamada, o descargas de video,



puede soportar también aplicaciones más sencillas como el envío de mensajes SMS o una simple llamada de voz. La tabla 1.2 describe las velocidades de transmisión de datos necesarias de algunos servicios.

Tabla 1.2. Velocidades de transmisión de datos en WCDMA.

Servicio	Velocidad de transmisión de datos	Aplicación	Método de Conmutación
Voz	16 Kbps	Llamada de voz	Conmutación de circuitos
Mensajería	14.4 Kbps	SMS, MMS	Conmutación de paquetes
Datos conmutados	14.4 Kbps	E-mail	Conmutación de circuitos
Multimedia de alta interactividad	Valor máximo 128 Kbps	Video-llamada	Conmutación de paquetes
Multimedia de alta interactividad	Valor máximo 384 Kbps	Juegos en línea	Conmutación de circuitos
Multimedia	Valor máximo 2 Mbps	Video <i>Streaming</i>	Conmutación de paquetes

La velocidad de transmisión de datos se mantiene constante durante toda la trama de 10ms. La velocidad de los códigos con que se ensancha la señal se define como tasa de chip (*Chip Rate*) y para WCDMA se establece un valor de 3.84Mcps en modo FDD, mientras que en modo TDD soporta tasas de 1.28Mcps y 3.84Mcps [9] [18].

El ensanchamiento del espectro de la señal implica un incremento del ancho de banda requerido para la comunicación, lo cual puede resultar costoso, sin embargo, las ventajas que ofrece WCDMA respecto a otras tecnologías le permiten obtener mayor capacidad y mejor desempeño, lo que se traduce como una mejor prestación de los servicios. Estas ventajas se ven reflejadas al momento de dispersar la energía de la señal en todo el espectro disponible, logrando que la señal sea más resistente ante interferencia de banda estrecha, difícil de ubicar e interceptar [7] [8] [9].

Los códigos de ensanchamiento o canalización deben tener una baja correlación cruzada⁷ entre ellos, de tal manera que se pueda recuperar la información sin afectar la comunicación o información de otros usuarios, es por eso que en WCDMA se emplean códigos ortogonales en el enlace de bajada, los cuales se usan para diferenciar a los usuarios dentro de una misma celda, mientras que en el enlace de subida se emplean para separar los canales dedicados de datos y de control desde un mismo usuario y no para diferenciar usuarios unos de otros, esto debido a que durante el enlace de subida

⁷ La correlación cruzada dentro del concepto de espectro ensanchado permite determinar qué tanta similitud hay entre un conjunto de secuencias pseudoaleatorias [11].



los móviles no se encuentran sincronizados⁸ entre sí y no puede establecerse la ortogonalidad de los códigos [5][19].

1.2.5 Aleatorización

Debido a que en los sistemas WCDMA las fuentes de información transmiten en la misma frecuencia, es necesario el uso de códigos que permitan identificar tanto a las estaciones base como a los terminales de usuario, por lo cual se realiza la aleatorización (*Scrambling*). Al contrario del ensanchamiento, este proceso no modifica el ancho de banda de la señal y mucho menos la tasa de chip, ya que ésta es determinada en el ensanchamiento mediante los códigos de canalización.

La aleatorización es un procedimiento que permite la diferenciación de fuentes de información. En el enlace de bajada identifica a cada una de las estaciones base y se utiliza para reducir la interferencia entre ellas, además, debido a que durante este enlace la transmisión de las estaciones base no es ortogonal, el móvil debe identificar la BS correcta para sincronizarse con ella, encontrar la señal indicada mediante los códigos de canalización y posteriormente acceder a la información [16] [20] [21].

De igual manera, en el enlace de bajada los códigos de aleatorización también permiten diferenciar los sectores de una misma celda. Para el enlace de subida, estos códigos logran la separación de las comunicaciones de cada equipo terminal de usuario [5] [18].

Este proceso es complementario y posterior al de ensanchamiento como se muestra en la figura 1.6 [10], manteniendo la velocidad y el ancho de banda. Los dos procesos logran la separación y la ortogonalidad de las fuentes en un medio donde se utiliza la misma frecuencia, de esta manera se evita la interferencia, y asegura la transmisión de datos desde y hacia todos los usuarios.

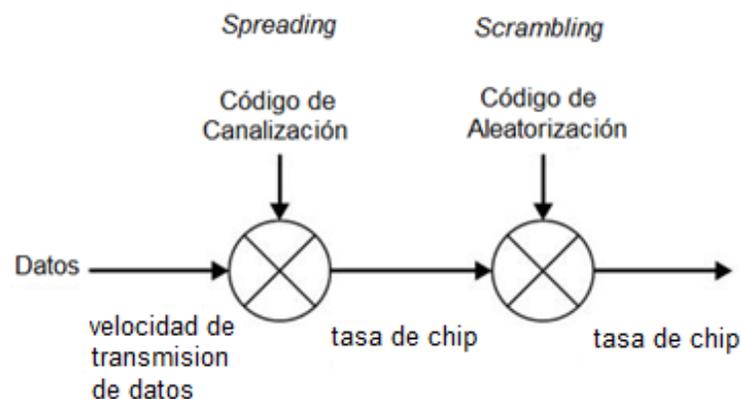


Figura 1.6. Ensanchamiento/Aleatorización.

⁸ WCDMA es un sistema asincrónico, las estaciones base no se encuentran sincronizadas unas con otras, no cuentan con un reloj maestro, pero los terminales logran sincronizarse con la BS a la que están conectadas por medio de los canales de sincronismo [5].

1.3 ARQUITECTURA DE LA RED WCDMA

El sistema WCDMA está conformado por varios elementos de red lógicos donde cada uno de ellos tiene una función específica. El sistema WCDMA presenta una estructura definida en tres subsistemas principales: el Equipo de Usuario (UE), la Red de Acceso Radio Terrestre UMTS (UTRAN, *UMTS Terrestrial Radio Access Network*), y el Núcleo de Red (CN, *Core Network*) [18], los cuales se pueden identificar en la Figura 1.7 [10]. La arquitectura presenta interfaces claramente definidas para la interconexión entre los tres subsistemas.

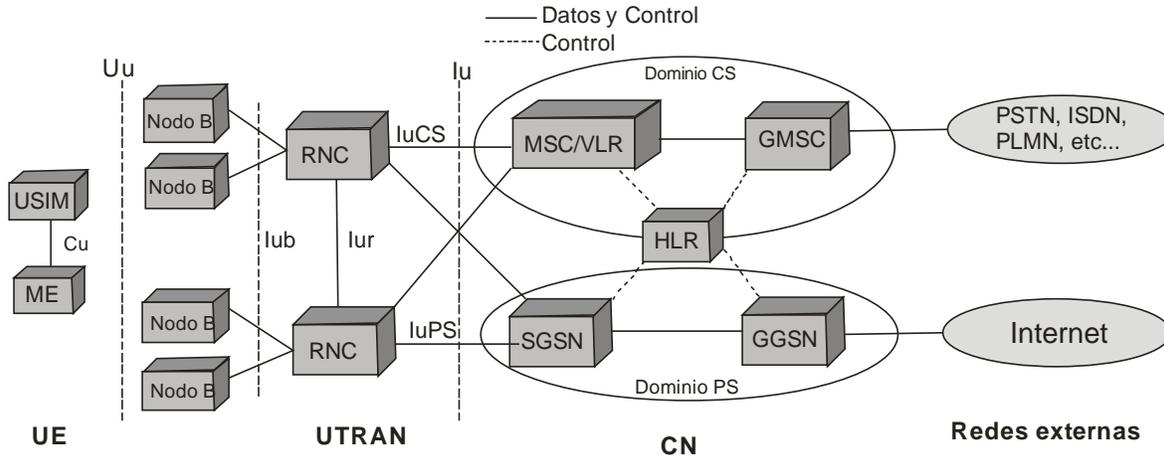


Figura 1.7. Esquema de la red WCDMA.

La arquitectura de la red WCDMA se basa en la arquitectura de GSM/GPRS con ciertas modificaciones, en la cual se identifica un dominio de conmutación de paquetes y un dominio de conmutación de circuitos. La figura 1.7 también muestra la interconexión entre todos los subsistemas y equipos de la red, hasta llegar a otros sistemas de telecomunicaciones como la Red Telefónica Pública Conmutada (PSTN, *Public Switched Telephone Network*), la Red Digital de Servicios Integrados (ISDN, *Integrated Services Digital Network*), la Red Móvil Terrestre Pública (PLMN, *Public Land Mobile Network*) o la red de Internet.

A continuación se describen los distintos elementos del sistema y sus posibles conexiones por medio de las distintas interfaces.

1.3.1 Equipo de Usuario

El Equipo de Usuario (UE) es el dispositivo con el cual el usuario accede a la red siempre y cuando tenga cobertura y la red tenga capacidad de realizar una llamada nueva. El dispositivo debe soportar los estándares para los que está diseñado, ya sea GSM, WCDMA o alguna otra tecnología, y así lograr la comunicación con la red de acceso. Los nuevos equipos tienen la capacidad de soportar varios estándares o interfaces y así acceder a los sistemas de telecomunicaciones a través de distintas tecnologías [18].



El subsistema UE está conformado por el Equipo Móvil (ME, *Mobile Equipment*) el cual se conecta al Módulo de Identificación del Subscriptor UMTS (USIM, *UMTS Subscriber Identity Module*) por medio de la interfaz Cu [10] [22] [24].

- El Equipo Móvil (ME) es el terminal radio que se conecta mediante la interfaz Uu, bajo la tecnología de acceso múltiple WCDMA, a la red de acceso (UTRAN).
- El Módulo de Identificación del Subscriptor UMTS (USIM) es una tarjeta pequeña que contiene la identidad del subscriptor e información que facilita la autenticación del terminal y la encriptación de la información.
- Interfaz Uu. Es la interfaz radio WCDMA, con la cual se conecta el UE con el Nodo B, logrando el acceso a la red UTRAN, siendo esta la interfaz más importante en la conexión WCDMA.
- Interfaz Cu. Es la interfaz eléctrica entre el USIM y el ME en el UE. Esta interfaz sigue los formatos estándar de los Módulos de Identificación al Subscriptor (SIM, *Subscriber Identity Module*) [10].

1.3.2 Red de Acceso Radio Terrestre UMTS

La Red de Acceso Radio Terrestre UMTS (UTRAN, *UMTS Terrestrial Radio Access Network*) está compuesta por uno o más Sub-sistemas de Red Radio (RNS, *Radio Network Sub-systems*), el cual a su vez está conformado por un Controlador de Red Radio (RNC, *Radio Network Controller*) y varios Nodos B.

El Controlador de Red Radio (RNC) es un administrador autónomo de recursos que permite descentralizar el tráfico y controla los protocolos de mensajes y procesos entre el UE y el CN. Los RNC se conectan entre sí por medio de la interfaz Iur. El RNC controla uno o varios Nodos B, los cuales se conectan con el RNC por medio de la interfaz Iub [10] [23]. El Nodo B informa al RNC acerca de decisiones de trasposos suaves (SHO, *Soft Handover*) o retransmisiones para los UE [5]. El RNC se conecta con el Centro de Conmutación Móvil (MSC, *Mobile Switching Center*) por medio de la interfaz IuCS; por otro lado, el RNC se conecta al Nodo de Soporte al Servicio GPRS (SGSN, *Serving GPRS Support Node*) a través de la interfaz IuPS. Las funciones principales que tiene el RNC son:

- Control de trasposos (*handover*) para movilidad del usuario.
 - Manejo de los recursos de transporte de la interfaz Iu.
 - Control de potencia de lazo externo para minimizar la interferencia.
 - Manejo de tráfico de los canales comunes.
 - Control de acceso aleatorio para evitar congestión.
 - Manejo de códigos de ensanchamiento o canalización en el enlace de bajada.
 - Funciones de seguridad de UTRAN.
- Interfaz Iu. Conecta la UTRAN con el núcleo de red. Esta interfaz se divide en dos interfaces distintas, las cuales dependen del tipo de información que se desea comunicar. La interfaz Iu Conmutación de Circuitos (IuCS, *Iu Circuit Switched*) conecta



la red UTRAN con el MSC cuando se quiere transmitir voz o se requiere conmutación de circuitos en la transmisión, mientras que la interfaz de Conmutación de Paquetes (IP, *IP Packet Switched*) se utiliza para conectar la red UTRAN con el SGSN cuando la información a transmitir son paquetes de datos o se desea una conexión a Internet [10] [18].

- Interfaz Iur. Conecta los distintos RNCs de la UTRAN entre sí. Su principal función es la de permitir el traspaso suave (SHO) entre estaciones base que pertenecen a diferentes RNCs.
- Nodo B: Nodo de Estación Base. Es un transceptor radio que se encarga principalmente de conectar al usuario por medio de la interfaz radio Uu (WCDMA) con la UTRAN. Este elemento se encarga de mapear los canales de transporte de la interfaz Iub en los canales físicos de la interfaz Uu.

Las funciones principales del Nodo B son:

- Reporte de medidas de señal para el RNC en el enlace de subida.
- Estimación de tráfico.
- División de las tramas internas del Nodo B.

1.3.3 Núcleo de Red

El Núcleo de Red (CN, *Core Network*) incorpora inteligencia en aspectos de señalización de tráfico y transporte de la información, además cuenta con diferentes interfaces para conexión con otras redes de telecomunicaciones [5].

El núcleo de red maneja dos dominios:

- El dominio de Conmutación de Circuitos (CS, *Circuit Switching*), se basa en el transporte de telefonía (voz), conectando así a las redes PSTN con la red UTRAN y viceversa. Este dominio está conformado por el MSC que tiene funciones específicas:
 - Registro de ubicación del móvil en el Registro de Usuarios Locales (HLR, *Home Local Register*).
 - Asignación dinámica de recursos.
 - Interconexión con otras redes.
 - Almacenamiento de datos para tarificación.

En el MSC a la vez se encuentra el Registro de Usuarios Visitantes (VLR, *Visitor Location Register*) el cual se encarga de controlar la itinerancia (*roaming*) de los UE dentro del área MSC. Cuando un UE entra a un área de servicio de otro operador se realiza el proceso de registro como usuario visitante. La pasarela del Centro de Conmutación Móvil (GMSC, *Gateway Mobile Switching Center*) permite la interconexión con redes externas que manejen CS, como la PSTN.



- El dominio de Conmutación de Paquetes (PS, *Packet Switching*), tiene como principal función el transporte eficiente de datos, de esta manera los UE tienen la posibilidad de establecer una conexión con redes externas tales como la Red Pública de Datos (PDN, *Public Data Network*) o Internet. Este dominio está conformado por el SGSN con funciones como:
 - Información de usuarios.
 - Establecimiento de contextos de Protocolos de Paquetes de Datos (PDP, *Packet Data Protocol*).
 - Control de acceso y seguridad.

De otro lado se encuentra el Nodo de Soporte Pasarela GPRS (GGSN, *Gateway GPRS Support Node*) el cual proporciona la interconexión con redes externas por Conmutación de Paquetes. Almacena datos de usuarios e información de encaminamiento. Además permite la interconexión con la red de internet que maneja PS.

El HLR contiene una base de datos donde almacena y gestiona la información de los usuarios, además maneja los datos de ubicación permitiendo el encaminamiento de las llamadas y mensajes hacia el MSC o el SGSN. Es un elemento de red que es usado por ambos dominios.

1.4 CANALES EN WCDMA

WCDMA es un sistema de comunicaciones basado en niveles de protocolos donde se divide el trabajo, facilitando la administración y el funcionamiento de todo el sistema. Este funcionamiento se traduce en tres niveles: Nivel Físico (*Physical Layer*), Nivel de Enlace de Datos (*Data Link Layer*) y Nivel de Red (*Network Layer*).

El nivel físico proporciona los requerimientos que permiten establecer, mantener y liberar una comunicación. Este nivel adecúa los datos provenientes de los niveles superiores para permitir que sean enviados de manera segura a través de un canal radio por medio del cual intercambian información una estación base (BS) y un móvil o equipo de usuario (UE). El nivel de enlace de datos está compuesto por dos subniveles, el subnivel de Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*) y el subnivel de Control del Enlace Radio (RLC, *Radio Link Control*). El nivel de red desarrolla funciones relativas a la gestión de los recursos radio (RRM, *Radio Resource Management*), donde se controla la admisión de usuarios, la congestión en la red y se selecciona el formato de transmisión en cuanto a la velocidad de transmisión de datos más adecuada en cada momento.

Cada nivel cuenta con interfaces que le permiten comunicarse con los niveles contiguos, por ejemplo, el nivel físico maneja canales Físicos, pero se relaciona con el subnivel MAC mediante los canales de Transporte, mientras que el subnivel MAC ofrece servicios al subnivel RLC a través de los canales lógicos. Estos canales llevan información propia de su nivel y transportan los datos de usuario, por lo cual se mapean hasta llegar al nivel

físico para ser transmitidos a través del medio radioeléctrico [10]. La figura 1.8 [5] muestra esta distribución. Cabe resaltar que existen canales dedicados y canales comunes. Un canal dedicado representa un recurso para un único usuario, mientras que un canal común representa un recurso que es compartido por varios, o todos los usuarios de una celda.

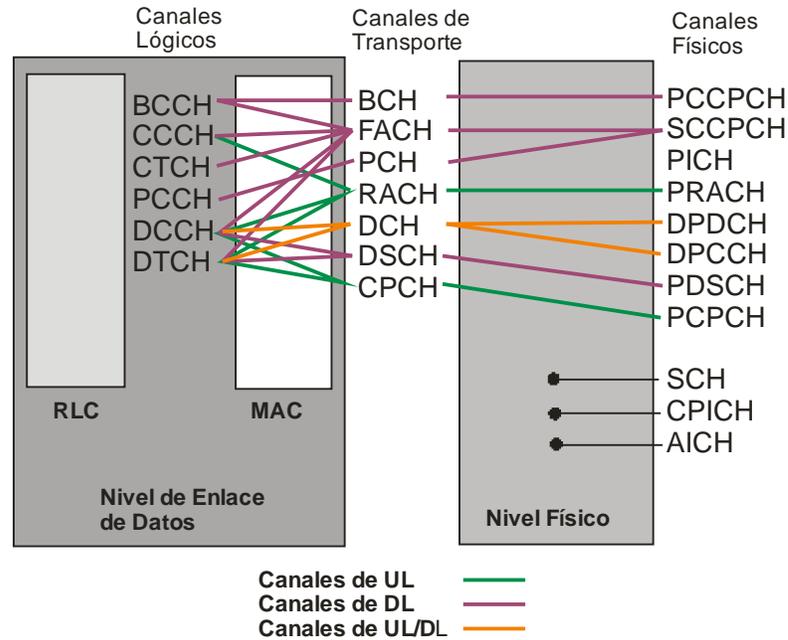


Figura 1.8. Canales en WCDMA.

1.4.1 Canales Lógicos

Proporcionan los servicios de transferencia de datos en los subniveles RLC y MAC, y se dividen en canales lógicos de control y canales lógicos de tráfico. Los canales lógicos de control llevan la información que permite controlar la comunicación en el nivel de enlace de datos, mientras que los canales lógicos de tráfico transportan la información de usuario. La tabla 1.3 [5] [12] resume de manera general los canales lógicos de WCDMA.

1.4.2 Canales de Transporte

Proporcionan los servicios de transferencia de datos entre el subnivel MAC y el nivel físico. Los canales de transporte se dividen en dos grupos: los canales dedicados y los canales comunes. En WCDMA se define un canal de transporte dedicado, y seis tipos de canales de transporte comunes, resumidos en la tabla 1.4 [5] [12].

1.4.3 Canales Físicos

Los canales físicos constituyen el medio por el cual se envía la información de control y de datos de usuario. Algunos canales físicos contienen a los canales de transporte, a la vez que existen otros canales que llevan sólo información relevante al nivel físico, por lo que



son transparentes a los niveles superiores. La tabla 1.5 [5] [12] resume de manera general los canales físicos de WCDMA.

Tabla 1.3. Canales lógicos de WCDMA.

	Nombre	Dirección	Descripción
BCCH	Canal de Control de Difusión (<i>Broadcast Control Channel</i>).	BS → UE	Envía información de la red y la celda.
PCCH	Canal de Control de Notificación (<i>Paging Control Channel</i>).	BS → UE	Avisos de llamada a los UE no localizados o localizados.
DCCH	Canal de Control Dedicado (<i>Dedicated Control Channel</i>).	BS ↔ UE	Información de control entre la red y los usuarios con conexión.
CCCH	Canal de Control Común (<i>Common Control Channel</i>).	BS ↔ UE	Información de control entre la red y los usuarios sin conexión. Incluye la solicitud de acceso al servicio y los mensajes de respuesta.
DTCH	Canal de Tráfico Dedicado (<i>Dedicated Traffic Channel</i>).	BS ↔ UE	Información y servicios.
CTCH	Canal de Tráfico Común (<i>Common Traffic Channel</i>).	BS → UE	Transferencia de datos de usuario hacia un grupo de terminales. Servicios en formato uno a muchos.

Tabla 1.4. Canales de transporte de WCDMA.

	Nombre	Dirección	Descripción
DCH	Canal Dedicado (<i>Dedicated Channel</i>).	BS ↔ UE	Transmisión de información de usuario (voz, video, datos), o datos de servicio y control de los niveles superiores.
BCH	Canal de Difusión (<i>Broadcast Channel</i>).	BS → UE	Envía información del sistema y de la celda.
FACH	Canal de Acceso hacia Adelante (<i>Forward Access Channel</i>).	BS → UE	Canal común usado para transmitir información de control y datos de usuario, que es el canal par o complemento del RACH.
PCH	Canal de Notificación (<i>Paging Channel</i>).	BS → UE	Información para el procedimiento de notificación o aviso de llamada a los usuarios de la red.



RACH	Canal de Acceso Aleatorio (<i>Random Access Channel</i>).	BS ← UE	El UE lo utiliza para realizar un acceso inicial, solicitar un servicio, o actualización de posición.
CPCH	Canal de Paquetes Común (<i>Common Packet Channel</i>).	BS ← UE	Tráfico de paquetes compartido.
DSCH	Canal Compartido en el Enlace de Bajada (<i>Downlink Shared Channel</i>).	BS → UE	Información de usuario y/o información de control.

Tabla 1.5. Canales físicos en WCDMA.

	Nombre	Dirección	Descripción
PCCPCH	Canal Físico Primario de Control Común (<i>Primary Common Control Physical Channel</i>).	BS → UE	En él se mapea el BCH.
SCCPCH	Canal Físico Secundario de Control Común (<i>Secondary Common Control Physical Channel</i>).	BS → UE	En él se mapea el PCH y el FACH.
PRACH	Canal Físico de Acceso Aleatorio (<i>Physical Random Access Channel</i>).	BS ← UE	En él se mapea el RACH.
PDSCH	Canal Físico Compartido en el Enlace de Bajada (<i>Physical Downlink Shared Channel</i>).	BS → UE	En él se mapea el DSCH.
PCPCH	Canal Físico de Paquetes Común (<i>Physical Common Packet Channel</i>).	BS ← UE	En él se mapea el CPCH.
DPDCH	Canal Físico de Datos Dedicado (<i>Dedicated Physical Data Channel</i>).	BS ↔ UE	Canal de datos para transmitir información concreta del DCH.
DPCCH	Canal Físico de Control Dedicado (<i>Dedicated Physical Control Channel</i>).	BS ↔ UE	Información relacionada a la operación del nivel físico. En él se mapea el DCH.
SCH	Canal de Sincronización (<i>Synchronization Channel</i>).	BS → UE	Utilizado por los móviles para sincronizarse. El SCH transmite un código de sincronización primario, único para todo el sistema, y la combinación de códigos de sincronización secundarios que identifican una celda en particular.



CPICH	Canal Piloto Común (<i>Common Pilot Channel</i>).	BS → UE	Transmite una portadora usada para estimar las condiciones del canal. Piloto de referencia de potencia y fase, permite obtener el código de <i>scrambling</i> de la celda.
AICH	Canal de Adquisición de Indicadores (<i>Acquisition Indicator Channel</i>).	BS → UE	Utilizado para indicar la recepción de preámbulos de la secuencia del canal RACH.

1.5 CELDAS EN SISTEMAS DE TELEFONIA CELULAR

Según los requerimientos de capacidad y cobertura de un área específica, en el diseño de la red se definen celdas de diferentes tamaños, cuyo radio de cobertura depende de la potencia de transmisión, del tamaño y del tipo de antenas de las estaciones base y de la cantidad de carga que tenga el sistema en un determinado momento. Basados en estos factores surgen las definiciones de los sistemas macrocelulares, microcelulares, picocelulares y ahora los nuevos sistemas femtocelulares. En la figura 1.9 [18] puede observarse dicha distribución.

Las macroceldas son celdas orientadas a brindar cobertura en zonas donde la población se encuentra dispersa (zonas rurales), o donde los usuarios con llamadas activas se mueven a gran velocidad (carreteras) lo que permite disminuir el número de traspasos y reducir la probabilidad de caída de llamadas [25]. En este tipo de celdas las estaciones base se encuentran generalmente en lugares altos, transmitiendo con una potencia máxima de salida de 46 dBm [26], lo que les permite lograr un radio de cobertura entre 1.5 y 20 km.

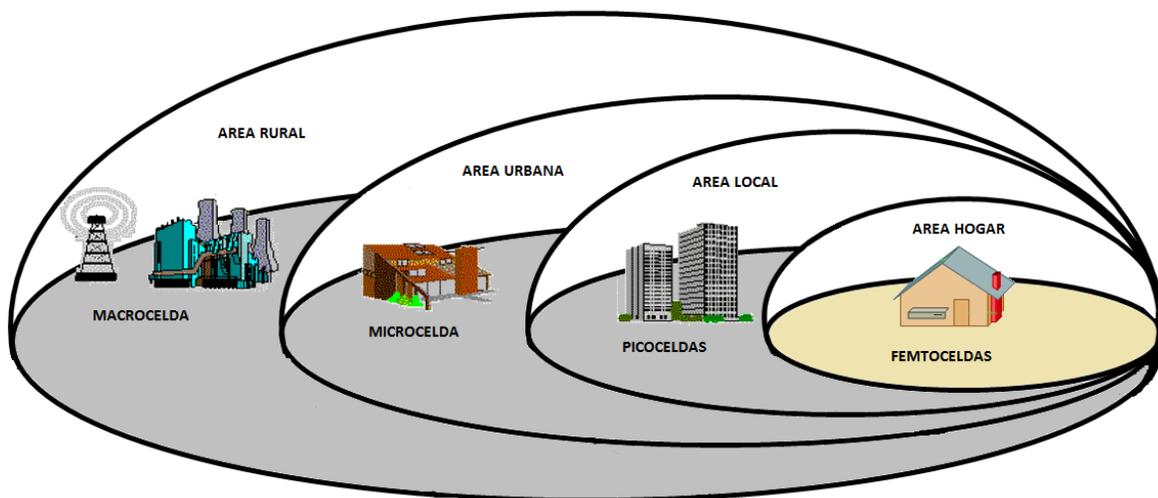


Figura 1.9. Sistemas celulares.



Las microceldas son celdas que brindan mayor capacidad respecto a las macroceldas⁹. Las microceldas son celdas orientadas a brindar cobertura en zonas donde la población se encuentra altamente concentrada (zonas urbanas) y existe una elevada demanda de tráfico. Las estaciones base de las microceldas cuentan con antenas ubicadas a una altura menor que la altura promedio de los edificios, transmitiendo con una potencia máxima de salida de 38 dBm [19], lo que les permite lograr un radio de cobertura entre 300 y 700 m.

Las picoceldas son celdas orientadas a brindar cobertura en zonas donde existe una alta densidad de usuarios tales como teatros, centros comerciales, edificios, etc. Donde la movilidad de los usuarios es limitada [25]. Las estaciones base de picoceldas transmiten con una máxima potencia de 24 dBm [19], lo que les permite lograr un radio de cobertura entre 70 y 250 m.

Debido a la continua evolución y crecimiento de las comunicaciones inalámbricas y a la constante demanda de sistemas que brinden mayor capacidad, cobertura y permitan prestar todo tipo de servicios con calidad, se han venido desarrollando tecnologías que suplen dichas necesidades, entre ellas las femtoceldas, tecnología que será analizada a profundidad en el presente trabajo.

1.5.1 Femtoceldas

Las femtoceldas son una tecnología estandarizada por el Proyecto de Cooperación en Sistemas de Tercera Generación (3GPP, *3rd Generation Partnership Project*) como pequeñas estaciones base denominadas Nodos B de Hogar (HNB, *Home Node B*), las cuales ofrecen ventajas técnicas y económicas en el momento de ser utilizadas como “puntos de acceso de radio 3G”. Estas pequeñas estaciones base mejoran las conexiones de los móviles en ambientes de interiores, fortaleciendo la cobertura y mejorando la calidad de la comunicación en el hogar y la oficina [27] [28] [29] [30], dada la considerable atenuación que sufren las señales cuando atraviesan paredes de edificios, construcciones y/o subterráneos. Las femtoceldas proporcionan altas velocidades de transmisión de datos a los usuarios de sistemas de comunicación móvil celular, incrementando adicionalmente la capacidad para redes micro y/o pico celulares [31]. Las femtoceldas permitirán a los operadores móviles diferenciarse en el momento de ofrecer nuevos servicios [32], ya que su uso disminuirá la cantidad de usuarios por antena, mejorando la velocidad de transmisión de datos y garantizando una mejor calidad en los servicios ofrecidos [33], con un nivel de potencia menor por parte de los móviles, lo cual a su vez genera un menor consumo de energía y por lo tanto una mayor autonomía de operación a

⁹ De manera general todas las estaciones base cuentan con los mismos recursos de comunicación. Considerando una distribución uniforme de usuarios en el área de servicio, cuando estos recursos son aplicados a una celda de menor tamaño, estos recursos son compartidos por un menor número de usuarios, lo que se percibe como una mayor capacidad. Se debe tener en cuenta que la instalación de un gran número de estaciones base puede incrementar considerablemente la capacidad del sistema, pero esto también implica altos costos de inversión.



los dispositivos móviles, un menor riesgo al usuario por posibles efectos de exposición a radiación electromagnética y menor interferencia.

Por otra parte los usuarios acceden a la red fija del sistema mediante el UE. La potencia máxima de transmisión depende de la clase de terminal. En la tabla 1.6 [12] se muestran las máximas potencias de transmisión para cada una de las clases de UE, acompañado de la respectiva tolerancia [24].

Tabla 1.6. Máxima potencia de transmisión UE.

Clases de UE	Máxima potencia de transmisión [dBm]	Tolerancia [dB]
1	33	+1/-3
2	27	+1/-3
3	24	+1/-3
4	21	+2/-2

1.5.1.1 Características

Las femtoceldas se describen como “pequeñas estaciones base” de telefonía móvil cuyo tamaño es similar al de un enrutador de Línea de Abonado Digital (DSL, *Digital Subscriber Line*) o al de un cable módem tradicional, que brinda cobertura inalámbrica de segunda y tercera generación (2G y 3G) en ambientes interiores, complementando la cobertura de la BS de un operador móvil, obligando al UE a hacer traspasos desde la celda mayor a la femtocelda cada vez que se ingrese al área de cobertura de la misma, dentro de hogares, oficinas y pequeños espacios [27] [34].

El funcionamiento de las femtoceldas se aplica sobre cualquier tecnología de comunicación móvil e inalámbrica; en este caso específico se trabaja sobre WCDMA. Cada femtocelda cumple funciones de Nodo B y tiene una conexión Ethernet, mediante la cual haciendo uso del Protocolo Internet (IP, *Internet Protocol*), se conecta con el RNC y el núcleo de red (CN), con el fin de brindar a los terminales móviles el acceso a la infraestructura del operador de red [27] [28].

Dado que las estaciones base utilizan la interfaz Iub para conectarse con el Núcleo de Red (CN), en el esquema de las femtoceldas se desarrolla el concepto de “Iub sobre IP” (*Iub over IP*) y se define el enlace de las femtoceldas con el núcleo de red como una conexión de banda ancha a través de Internet, incluyendo además aspectos de calidad y seguridad. En la figura 1.10 [28] se muestra esta conexión.

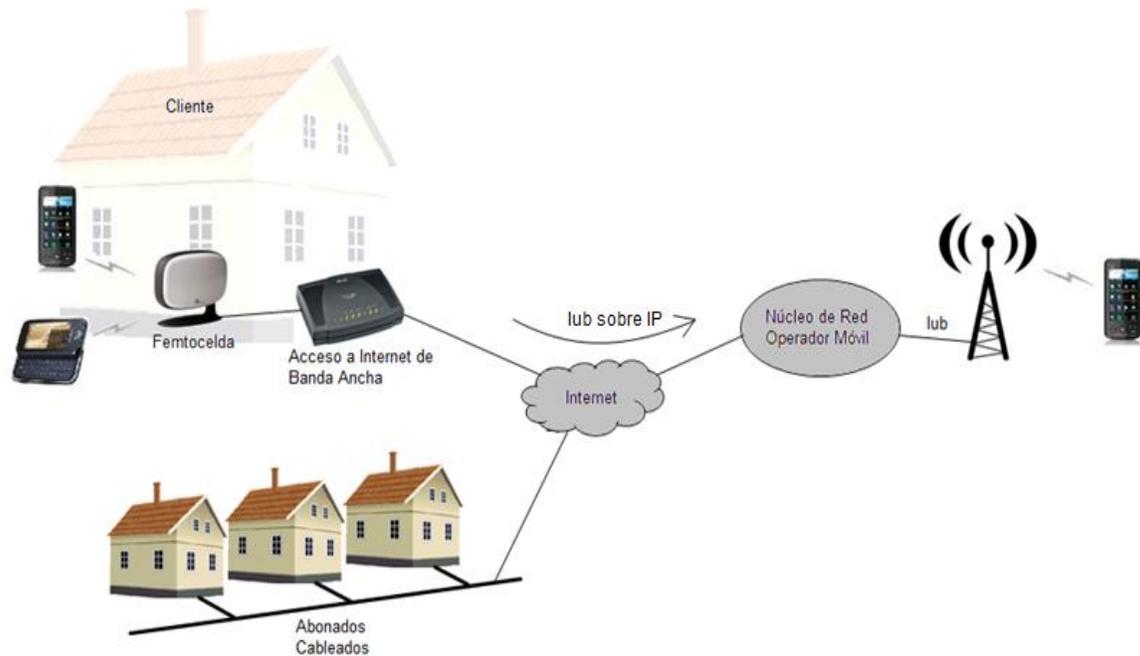


Figura 1.10. Diagrama de conexión de una femtocelda.

De esta manera, las llamadas se encaminan a través de la conexión de banda ancha, lo que representa un beneficio económico para los operadores al reducir el tráfico soportado por la red de acceso (UTRAN) de las estaciones base tradicionales, sobretodo en zonas de alta densidad de usuarios como son los centros de las ciudades y las zonas de oficinas, donde suelen presentarse problemas de cobertura por los tipos de construcciones en dichos lugares. Por otro lado, el uso de femtoceldas expande la red del operador sin la necesidad de instalar nuevas estaciones base, incluso en lugares donde no llega la red móvil, siempre y cuando se cuente con acceso a internet. Como consecuencia, se mejora la cobertura y capacidad, se reduce la congestión, se incrementa la velocidad de transmisión de datos, representando una mejor calidad en la prestación de los servicios [28] [35].

Las femtoceldas brindan a los usuarios servicios en interiores, donde los niveles de potencia de señal de la red tradicional son bajos, controlando la interferencia¹⁰, a través de un teléfono móvil convencional [27] [28] [35].

1.5.1.2 Ventajas

Las ventajas del uso de femtoceldas para los operadores son [27] [35]:

- **Mayor capacidad de la red** al reducir la carga en las estaciones base convencionales en el momento en que el terminal realice el traspaso hacia una femtocelda.

¹⁰ Aspecto limitante en sistemas de tercera generación basados en WCDMA.



- **Reducción de los costos de capital** por la inclusión de femtoceldas en la red. Aún cuando el número de suscriptores dentro de la red del operador móvil aumente, introducir femtoceldas representará una reducción en los costos de capital para soportar dichos usuarios, con un menor costo de instalación y mantenimiento respecto a equipos tradicionales (macrocelulares, microcelulares, picocelulares).
- **Reducción de la carga de tráfico hacia el núcleo de red (CN) del sistema celular**, siendo un tráfico soportado por la conexión de banda ancha, ya sea cable, fibra o línea DSL.
- **Mayor calidad de los servicios ofrecidos en ambientes interiores**, traducido en una mayor confianza de los usuarios ante las mejoras ofrecidas por femtoceldas ante interferencia, ruido y niveles bajos de señal en ambientes interiores (*indoor*), típicos de los sistemas de tercera generación basados en WCDMA; logrando una mayor aceptación por parte de los clientes.
- **Oportunidad de expandir la red de un operador con las llamadas “Zonas Femto”** donde se ofrecen servicios de valor agregado de nueva generación, basados en conceptos como la auto-detección de la ubicación de usuario y la interacción con las redes del hogar, soportando la transmisión de archivos entre un computador personal y el teléfono celular y la notificación a los padres de la ubicación de sus hijos, permitiendo al operador competir de un modo más eficiente con los servicios emergentes de Voz sobre IP (VoIP, *Voice over IP*).

El uso de femtoceldas representa ventajas para el usuario [27] [35], dentro de las cuales se destacan:

- **Incremento de la cobertura en interiores** con una señal fuerte provista por la femtocelda.
- **Servicios de mejor calidad.** Debido al menor número de usuarios por punto de acceso, las señales sufren menos interferencia y por lo tanto les permite alcanzar mayores velocidades de transmisión de datos para soportar servicios de banda ancha de nueva generación.
- **Menor costo de las llamadas desde las femtoceldas** por el uso de la conexión Ethernet para comunicarse con la infraestructura del operador de red.
- **Precio de compra** comparable al de un enrutador Wi-Fi.

1.5.1.3 Especificaciones Técnicas

En la tabla 1.7 [27] [35] se muestran algunas especificaciones técnicas de las femtoceldas.

Tabla 1.7. Especificaciones técnicas de femtoceldas.

Característica	Descripción.
Potencia de Transmisión	$\leq +20$ dBm. $\leq +17$ dBm. Con diversidad de transmisión (Sistemas de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO ¹¹ , <i>Multiple Input – Multiple Output</i>) [19].
Cobertura	Radio de cobertura del orden de 10 – 150 m aproximadamente [34].
Capacidad	A diferencia de las redes macrocelulares que soportan cientos de usuarios, la capacidad de las femtoceldas se incrementa al soportar pocos usuarios y entregar a estos toda la capacidad de la red. Soporta entre 4 y 6 usuarios activos simultáneamente [27] [34].
Servicios	Soporta servicios mejorados, incluyendo la convergencia con los servicios móviles de VoIP y los de emergencia.
Conexión	La femtocelda emplea la conexión Ethernet para conectarse a través de internet con el RNC y el núcleo de la red, mediante el protocolo IP.

1.5.1.4 Arquitectura de Red

La arquitectura de red de una femtocelda sobre WCDMA establece la convergencia de: una estación base o Nodo B, un RNC y nodos típicos de una red macrocelular, dispuestos dentro de un Punto de Acceso (AP, *Access Point*) de tamaño comparable al de un enrutador inalámbrico (Wi-Fi), al que se le conoce como “femtocelda”, el cual fue definido por el 3GPP como HNB (*Home Node B*) o Nodo B de Hogar en el 2008. En la figura 1.11 [36] se presentan los elementos que constituyen la red de acceso del HNB (esta es una relación uno a muchos entre el HNB GW y las femtoceldas o HNBs) [36].

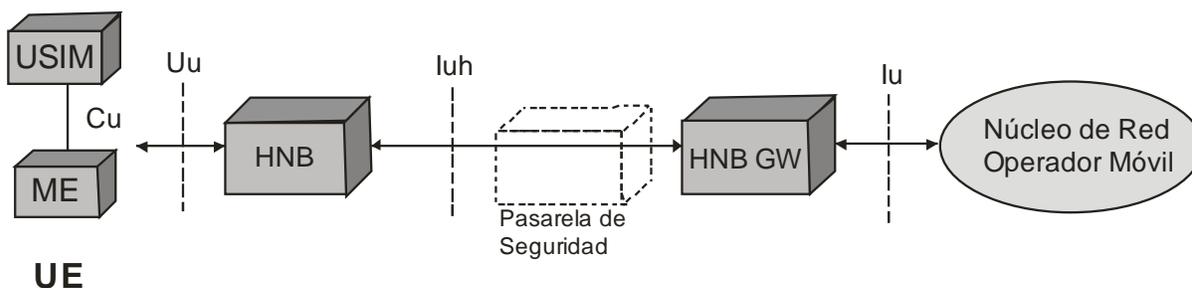


Figura 1.11. Arquitectura de red de una femtocelda.

¹¹ Un sistema MIMO hace referencia a un enlace en el cual el transmisor y el receptor están equipados con varias antenas para comunicarse mediante equipos inalámbricos. Estos sistemas aprovechan fenómenos físicos como la propagación multitrayecto para incrementar la velocidad de transmisión de datos y reducir la tasa de errores, al tiempo que se incrementan la cobertura y capacidad del sistema [15].



El bloque HNB GW representa la Pasarela de Nodo B de Hogar (HNB-GW, *Home Node B Gateway*) la cual se presenta al núcleo de la red (CN) como un RNC, donde se concentran las conexiones de los HNBs. La interfaz Iu entre el CN y el bloque HNB-GW cumple el mismo propósito que la interfaz entre el CN y un RNC, dentro de la red de un operador móvil tradicional. Un HNB hace las veces de una sola celda [36].

La Pasarela de Seguridad (SeGW, *Security Gateway*) es un elemento lógico que se encuentra separado de la arquitectura, pero se emplea como un elemento integrado al HNB GW. Provee las protecciones necesarias de seguridad para conectar las femtoceldas al núcleo de la red del operador a través de un medio tan inseguro y de uso público como Internet. La SeGW le permite a las femtoceldas ofrecer características diferenciadas que mejoran su operación, mientras se mantienen las interfaces estándar abiertas para garantizar la interoperabilidad entre los diferentes operadores.

Finalmente, el bloque HNB representa la femtocelda como dispositivo que proporciona al cliente la interfaz Uu a través de la cual se conecta con su Equipo de Usuario (UE). Soporta las funciones necesarias para el registro de usuarios a través de la interfaz Iuh y demás operaciones semejantes a las de un RNC [36].



2

INTERFERENCIAS SOBRE WCDMA

2.1 INTRODUCCION

La interfaz radio WCDMA presenta varios desafíos como método de acceso al medio, no solamente es susceptible al ruido, sino que también es afectada en gran medida por varios tipos de interferencia de banda ancha, alterando, modificando o destruyendo la señal, dependiendo de la movilidad y del entorno en que el usuario se encuentre. En este capítulo se estudian los diferentes tipos de interferencia que afectan la comunicación inalámbrica sobre WCDMA, además de los distintos métodos que permiten solucionar dichas interferencias.

De igual manera se analizan las diferentes ecuaciones de capacidad para un sistema inalámbrico con interfaz radio WCDMA.

2.2 TIPOS DE INTERFERENCIA EN WCDMA

2.2.1 *Interferencia Co-Canal*

La interferencia Co-Canal (CCI, *Co-Channel Interference*) se define como la señal interferente generada por usuarios móviles o estaciones base en distintas celdas pero que operan en la misma frecuencia portadora [37]. Como resultado, en las comunicaciones móviles celulares, en las celdas vecinas se asignan diferentes frecuencias como protección ante CCI. Sin embargo, en WCDMA el reuso de frecuencias es igual a uno, lo que indica que cada celda utiliza el mismo conjunto de frecuencias para difundir su señal, aprovechando de gran manera el espectro de frecuencia disponible. Esto es posible gracias a los códigos ortogonales de ensanchamiento o canalización que proporcionan unas propiedades de correlación cruzada perfectas en canales ideales [38], los cuales se usan para diferenciar a los usuarios dentro de una misma celda, de igual manera, los códigos de aleatorización en el enlace de bajada permiten identificar a cada una de las celdas y sus sectores. Para minimizar los efectos de la interferencia Co-Canal es

necesario diseñar una red celular que maximice la relación señal interferencia (S/I)¹² en el sistema [39].

2.2.2 Interferencia de Canal Adyacente

La Interferencia de Canal Adyacente (ACI, *Adjacent Channel Interference*) se presenta cuando dos operadores hacen uso de frecuencias adyacentes y se define como la relación entre la potencia transmitida y la potencia medida después de pasar por un filtro receptor en el canal adyacente. Ambas potencias de transmisión y recepción se miden con un filtro de raíz de coseno alzado (RRC, *Root-Raised Cosine Filter*) con un factor de redondeo (*roll-off*) de 0.22. Esta interferencia debe ser analizada en los sistemas de banda ancha donde no existen grandes bandas de guarda, como WCDMA. El ACI es causado por transmisores no ideales y por filtros receptores imperfectos [10]. Para que los canales adyacentes no deterioren el desempeño del sistema, deben de cumplir los requerimientos de atenuación mostrados en la tabla 2.1 [10].

Tabla 2.1. Separación entre canales adyacentes.

Separación de frecuencia	Requerimientos de atenuación
Canal adyacente (5 MHz de separación)	33 dB para el UL y el DL
Segundo canal adyacente (10 MHz de separación)	43 dB para el UL y 40 dB para el DL

La ACI entre operadores se observa en la figura 2.1 [10], donde un UE se encuentra recibiendo la señal del operador 1 mientras recibe simultáneamente una segunda señal interferente del operador 2. Teniendo en cuenta que los dos operadores hacen uso de frecuencias de canales adyacentes.

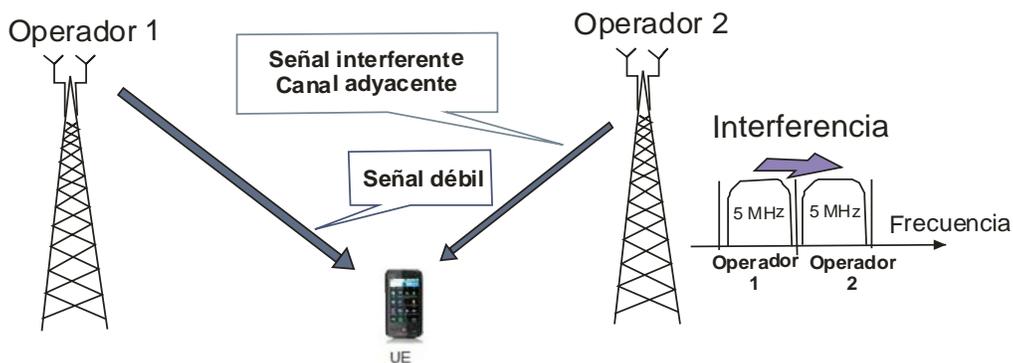


Figura 2.1. Interferencia de canal adyacente para el DL.

¹² Relación Señal a Interferencia (S/I o SIR, *Signal to Interference Ratio*) también conocida como Relación Portadora a Interferencia (C/I o CIR, *Carrier to Interference Ratio*), es la relación entre la potencia recibida de la portadora modulada (C) o de radiofrecuencia (S) y la potencia recibida de la señal interferente (I). La SIR se estudia en sistemas limitados por interferencia como WCDMA [15].

2.2.3 Efecto Cerca-Lejos

El efecto Cerca-Lejos se presenta cuando dos UE (uno que se encuentra cercano al Nodo B y el otro lejano) transmiten simultáneamente con igual nivel de potencia, haciendo que el UE que se encuentra cercano al Nodo B genere una alta interferencia, incrementando el nivel del piso de ruido del sistema, y haga que el Nodo B no logre detectar la señal del UE lejano; este tipo de situación se observa en la figura 2.2 [37]. Para hacer una analogía de este tipo de interferencia se puede imaginar a dos personas conversando en una habitación vacía, si la habitación está en silencio con seguridad las dos personas lograrán escucharse manteniendo niveles bajos de voz. Por otro lado, si se consideran las mismas dos personas tratando de conversar en un bar ruidoso, seguramente sería imposible para estas dos personas comunicarse manteniendo los mismos niveles de voz; la única manera de comunicarse sería que las dos personas hablaran con un tono de voz mucho más alto, lo que incrementaría el nivel de ruido en el bar, haciendo que las demás personas también hablen con niveles de voz más altos. Con el tiempo cada persona tendría que gritar para hacerse escuchar. No obstante el efecto Cerca-Lejos puede ser controlado mediante el control de potencia rápido en bucle o lazo cerrado, al mantener con igual nivel de potencia recibida en el nodo B, a todos y cada uno de los usuarios.

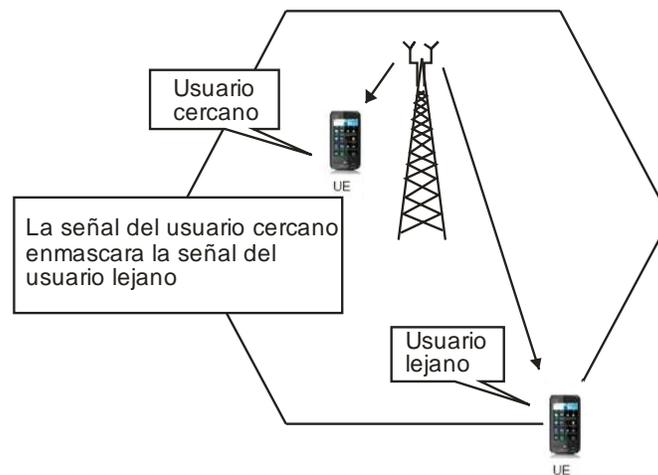


Figura 2.2. Efecto cerca-lejos sobre una celda.

2.2.4 Interferencia de Acceso Múltiple

Uno de los mayores problemas de WCDMA es la interferencia de espectro ensanchado o Interferencia de Acceso Múltiple (MAI, *Multiple Access Interference*), la cual es causada por múltiples usuarios en una celda usando la misma frecuencia de manera simultánea. El nivel de la MAI se incrementa, cuando las señales transmitidas pierden parte de su ortogonalidad debido al fenómeno de multitrayectoria, lo cual modifica las propiedades de correlación cruzada de las señales recibidas. Para un gran número de usuarios el nivel de la MAI llega a ser considerablemente apreciable y mucho mayor que el nivel de ruido térmico, por lo cual este último puede ser despreciado. La forma de controlar esta



interferencia es aplicando el principio de Detección Multiusuario (MUD, *Multiuser Detection*), también conocido como Detección Conjunta (*Join Detection*) o cancelación de interferencia sucesiva [40].

2.2.5 Contaminación Piloto

La Contaminación Piloto (*Pilot Pollution*) es también conocida como interferencia de DL. La señal del CPICH se usa para distinguir las diferentes celdas de la red, y típicamente transmite con una potencia constante. La señal CPICH se usa para indicar la calidad del canal radio entre un Nodo B y el UE, dependiendo del nivel de potencia recibida en el UE. Este tipo de interferencia se origina cuando en el área de dominio de una celda existen más señales audibles CPICH de las que el receptor puede procesar, o si ninguna señal CPICH es dominante. La contaminación puede ser controlada mediante la utilización de receptores tipo Rake¹³ [41].

2.3 SOLUCIONES A LA INTERFERENCIA

Debido a que distintas clases de interferencia limitan la capacidad y cobertura del sistema, es necesario aplicar procedimientos que contrarresten dichos efectos, y así garantizar una excelente calidad en la prestación del servicio. A continuación se presentan varios procesos que tienen como objetivo disminuir la interferencia en el sistema.

2.3.1 Control de Potencia

En los sistemas de comunicaciones móviles basados en CDMA, donde todos los usuarios comparten un canal de frecuencia común, el nivel de potencia con el cual se puede transmitir se convierte en un tema de suma importancia. Por ello se desarrolla el mecanismo de Control de Potencia, aspecto característico de WCDMA, que permite maximizar la capacidad del sistema, al igualar los valores de potencia recibidos, principalmente de las estaciones móviles durante el enlace de subida. El mecanismo de control de potencia busca neutralizar los efectos dañinos que la interferencia co-canal y la MAI tienen sobre las señales transmitidas. El control de potencia es uno de los procedimientos más destacados de la Gestión de Recursos Radio¹⁴ (RRM, *Radio Resource Management*).

¹³ Los receptores tipo Rake discriminan las componentes multitrayecto de la señal recibida y las suman en forma sincronizada o coherente para así obtener una única señal recibida. Gracias a la utilización de ese tipo de receptores, WCDMA utiliza la propagación multitrayecto como una ventaja en recepción. De igual manera mitiga la Interferencia Intersimbólica (ISI, *Inter-symbol Interference*) [15].

¹⁴ La gestión de recursos radio es responsable de controlar el uso eficiente de los recursos de la interfaz radio WCDMA. Esta gestión es necesaria para garantizar la calidad del servicio (QoS) y para mantener el área de cobertura definida, con el fin de ofrecer altas capacidades. RRM emplea algoritmos que pueden dividirse en: control de trasposos (*Handover Control*), control de potencia (*Power Control*), control de carga (*Load Control*), control de admisión (*Admission Control*), además de las funcionalidades del planificador (*Scheduling*), entre otros [10].

El efecto de respiración celular (*cell breathing*) es un mecanismo de auto-regulación de sistemas WCDMA que muestra el compromiso entre capacidad y cobertura, puesto que la cobertura de una celda depende de qué tan cargada se encuentre en un momento dado la celda. La respiración celular permite que una celda cargada disminuya el nivel de potencia de transmisión de su estación base, lo cual disminuye su área de cobertura, y obliga a los usuarios a realizar traspasos (*handovers*) a celdas adyacentes para de esta manera distribuir o reducir la carga. En otras palabras, las celdas más cargadas “se encogen”, cediendo parte de su carga a las celdas vecinas, con lo cual se logra un reparto más uniforme y por consiguiente se disminuye la interferencia en el sistema, con el objetivo de disminuir los efectos desfavorables en la capacidad del mismo, sin embargo, existe la posibilidad que las celdas vecinas no puedan asumir esta carga, impidiendo que se continúe con la prestación del servicio.

La interferencia co-canal y la MAI, conllevan a la disminución de la capacidad y cobertura del sistema [42], por lo cual es necesario implementar procedimientos de control de potencia como método de gestión de dichas interferencias, variando los niveles de potencia de los UEs al indicarles el valor adecuado para transmitir de acuerdo a su posición y a la carga de la celda en cierto momento mediante comandos de control de potencia. Teniendo en cuenta que los usuarios se encuentran en movimiento continuo, dichos comandos deben enviarse constantemente con el fin de compensar los desvanecimientos rápidos generados por multitrayectoria; para WCDMA se especifican 1500 comandos por segundo y el procedimiento se muestra en la figura 2.3 [10].

Durante el enlace de bajada no se presenta el efecto Cerca-Lejos pues se considera un escenario de uno a muchos, es decir, existe una única fuente para los usuarios, por lo que éstos reciben la señal deseada y las señales interferentes no deseadas con un mismo nivel.

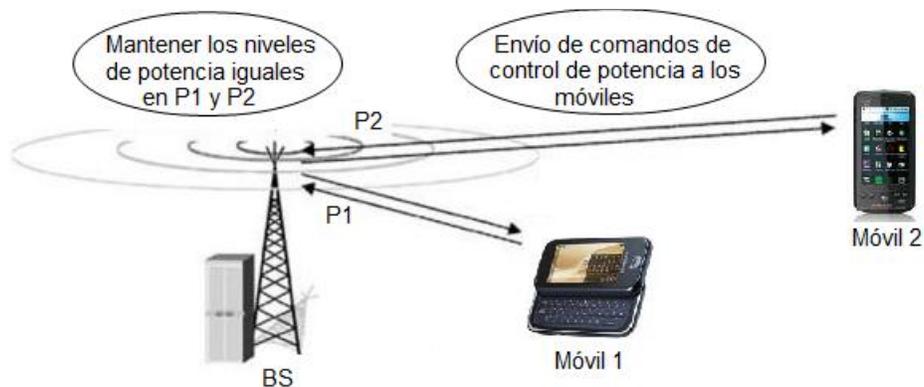


Figura 2.3. Control de potencia en el enlace de subida.

Controlar la potencia con que transmiten los terminales es la solución más adecuada para contrarrestar la disminución de la capacidad y cobertura del sistema, logrando que la potencia recibida por la estación base proveniente de los móviles sea exactamente igual, durante el enlace de subida [43]. Para el enlace de bajada también se establece el



mecanismo de control de potencia con el fin de optimizar la capacidad de la celda y controlar el consumo de energía. En otras palabras, una celda congestionada transmite con mayor potencia, interfiriendo con las celdas vecinas. De esta manera, el control de potencia en el enlace de bajada gestiona la interferencia intercelular, mientras que en enlace de subida controla la interferencia intracelular [43].

Dentro del proceso de control de potencia se definen dos tipos de procedimientos: el control de potencia en lazo abierto y el control de potencia en lazo cerrado.

2.3.1.1 Control de Potencia en Lazo Abierto

El Control de Potencia en Lazo Abierto (*Open-Loop Power Control*) se basa en la estimación por parte del UE de las pérdidas de trayecto estación base - móvil para determinar la potencia inicial con la cual este último debe transmitir al inicio de la conexión. El UE ajusta su potencia inicial de transmisión en función de un cálculo del nivel de potencia de señal recibido del CPICH (cuando el UE se encuentra en reposo y antes de iniciar la transmisión sobre el canal PRACH), y a partir de la información recibida a través del BCCH sobre los parámetros de potencia y demás características de la estación base [44].

Debe considerarse que los desvanecimientos rápidos en los enlaces de subida y bajada no están correlacionados (dada la amplia separación entre las bandas de frecuencia de ambos enlaces, en el modo FDD), por lo cual el valor estimado de potencia obtenido en el procedimiento de control de potencia de lazo abierto no es lo suficientemente seguro como para mantenerlo durante toda la transmisión, siendo necesario el uso de un control de potencia de lazo cerrado [44].

2.3.1.2 Control de Potencia en Lazo Cerrado

El control de Potencia en Lazo Cerrado (*Closed-Loop Power Control*) mide la Relación Señal a Interferencia (SIR) proveniente de un transmisor y le envía comandos para ajustar el nivel de potencia de transmisión a lo largo de la comunicación [44].

Durante este proceso se envía un comando TPC (*Control de Potencia de Transmisión, Transmit Power Control*) que indica la necesidad de aumentar o reducir la potencia tras comparar la SIR recibida con una SIR objetivo establecida como indicador; esta técnica se aplica tanto en el enlace de subida, como en el de bajada.

Durante el enlace de subida, si la SIR recibida es mayor que el valor objetivo, la estación base le ordena al móvil que disminuya su potencia a través de los comandos TPC. De igual manera, cuando la SIR recibida es menor que la SIR objetivo, el UE debe incrementar la potencia con la que está transmitiendo. Las mediciones de la SIR se realizan 1500 veces por segundo (1.5 KHz) para sistemas WCDMA, enviando los TPC lo suficientemente rápido de tal manera que permitan compensar el desvanecimiento rápido

tipo Rayleigh¹⁵ al neutralizar los cambios significativos de la señal en cada instante de tiempo. Este procedimiento se denomina Control de Potencia Rápido y permite controlar el efecto Cerca-Lejos [43] [44]. En la figura 2.4 [10], se muestra la actividad de este proceso, donde se compensan las variaciones del canal modificando la potencia de transmisión, logrando un nivel de potencia constante en el receptor.

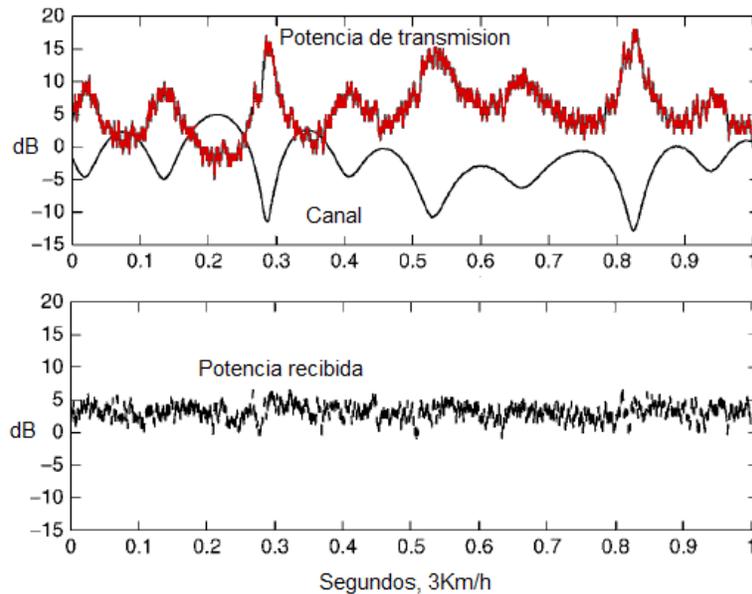


Figura 2.4. Control de potencia en lazo cerrado en el UL.

Durante el enlace de bajada, la potencia de la estación base debe repartirse entre los canales comunes y dedicados de todos los usuarios activos y dado que los canales en el enlace de bajada son ortogonales entre sí (a excepción del canal de Sincronización SCH) en teoría la potencia empleada por cada canal no representaría una interferencia para los demás. Sin embargo, es necesario un control de potencia que asegure que un canal determinado emplea sólo la potencia que necesita, con el fin de permitir que la potencia total soportada por el sistema esté disponible para los usuarios móviles, incrementando así la capacidad del sistema [12] [45].

El control de potencia de lazo cerrado se divide en:

- **Control de potencia de lazo externo** (*Outer loop power control*). Control de potencia que busca mantener la calidad de la comunicación de acuerdo a los requerimientos de Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) del servicio ofrecido, dado en términos de la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) o de la Tasa de Error de Bloque (BLER, *Block Error Rate*). En el enlace de subida el control

¹⁵ El desvanecimiento tipo Rayleigh es una consecuencia del fenómeno multitrayectoria, causado por la recepción de múltiples señales provenientes de la reflexión y difracción de las mismas al recorrer múltiples caminos, unos más largos que otros, haciendo que diferentes replicas de la misma señal lleguen en diferente tiempo y con diferente amplitud, generando en ciertos casos una atenuación considerable. Los canales afectados por multitrayectoria generan atenuaciones y retardos variables, efectos que pueden degradar significativamente el desempeño del sistema.

de potencia de lazo externo lo realiza el RNC y establece el valor de la SIR objetivo del nodo B, de acuerdo a las necesidades de cada radioenlace, valor que es actualizado para cada usuario de acuerdo a la calidad estimada de la conexión. En el enlace de bajada el control de potencia de lazo externo lo realiza el UE y le permite alcanzar la calidad requerida del radioenlace, establecida por la red [5] [10] [44].

La figura 2.5 [10] muestra el algoritmo general en el que se basa el RNC para realizar el control de potencia de lazo externo en el enlace de subida.

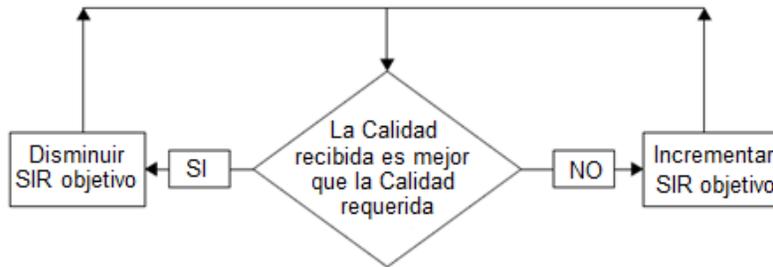


Figura 2.5. Algoritmo general del control de potencia de lazo externo.

El valor de la SIR objetivo depende de la velocidad del UE y del ambiente de propagación multirrayecto, y dado que el canal móvil es continuamente cambiante, también lo es el valor de la SIR objetivo. Además, el valor de la SIR objetivo debe considerarse variable puesto que al establecerla como fija la calidad resultante de la comunicación sería demasiado baja o demasiado alta, representando una transmisión innecesaria de potencia para el último caso. Debido a esto, lo más adecuado es establecer una SIR objetivo que cumpla con la condición mínima de calidad requerida, y a partir de este punto modificarla a medida que cambian las condiciones de la comunicación. Por esta razón se realiza la estimación de la SIR objetivo con una frecuencia de 10 a 100 veces por segundo (10Hz a 100Hz) por lo cual recibe el nombre de Control de Potencia Lento [44]. En la figura 2.6 [10] se observa el proceso de control de potencia de Lazo Externo.

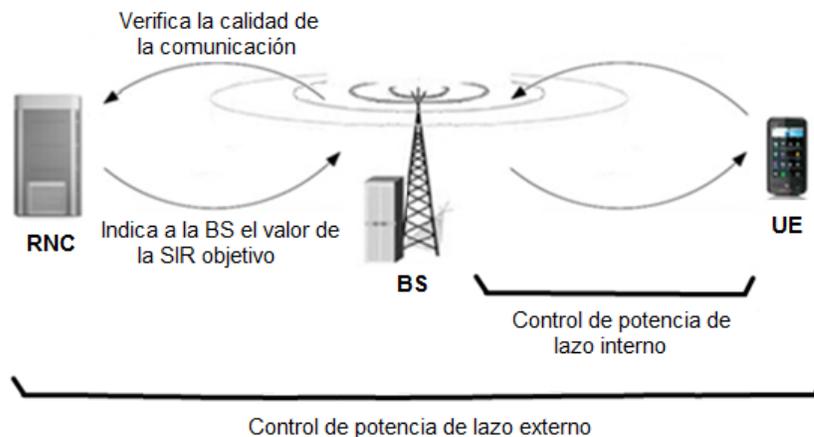


Figura 2.6. Control de potencia de lazo externo.

- **Control de potencia de lazo interno** (*Inner loop power control*). Conocido también como control de potencia rápido de lazo cerrado, donde se realizan mediciones de la SIR a una velocidad de 1500 veces por segundo. Esta técnica se basa en la información de realimentación entre el UE y la estación base, con el fin de compensar los desvanecimientos del canal. La figura 2.7 [10] muestra el proceso de control de potencia de lazo interno en el enlace de subida.

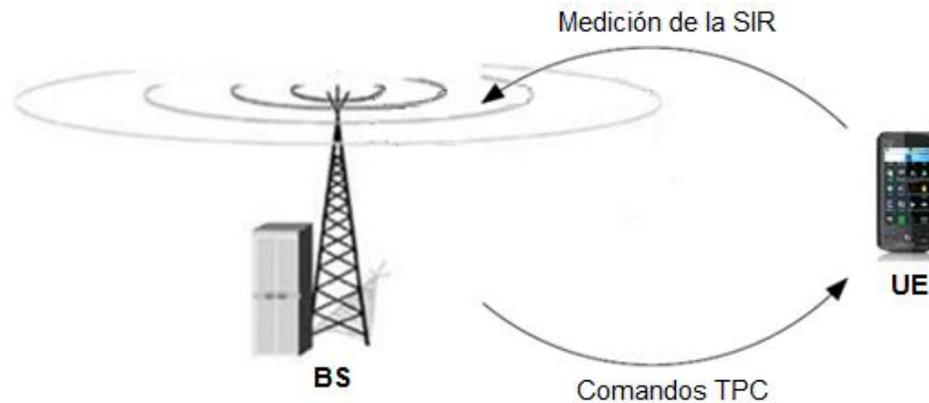


Figura 2.7. Control de potencia de lazo interno en el UL.

El proceso de control de potencia en lazo interno se aplica a los canales dedicados, en forma bidireccional, tanto en el enlace de subida como en el enlace de bajada. Durante el UL el nodo B recibe la SIR objetivo proveniente del RNC y la compara con el valor medido del canal físico de control dedicado (DPCCH) del enlace de subida. Esta acción se realiza para cada ranura (*Slot*) de tiempo. En caso que la estación base reciba una SIR mayor que la SIR objetivo, le envía un comando TPC de “disminuir potencia” al UE, a través del canal físico de control dedicado del enlace de bajada (DPCCH). De igual manera, si la SIR recibida por la BS es menor que la SIR objetivo, el comando TPC enviado al UE será “incrementar potencia” [12] [45].

Las variaciones de potencia que el UE realiza por comando en el enlace de subida son de 1 dB, 2 dB y 3 dB, cantidad conocida como tamaño de paso (*Step Size*) que se elige teniendo en cuenta factores como la velocidad del UE y las pérdidas de trayecto, aspectos que varían a lo largo de toda la comunicación, por lo cual, el tamaño de paso también es variable. En el enlace de bajada el tamaño de paso puede tomar cuatro valores: 0.5dB, 1dB, 1.5dB o 2 dB. La tabla 2.2 muestra los rangos de control de potencia de acuerdo a cada valor de tamaño de paso [24].

Para que el móvil cambie la potencia con la cual está transmitiendo, existen dos algoritmos que determinan el momento en que éste ajusta su potencia [5] [12] [24], estos son:

Algoritmo 1: la potencia de transmisión del UE se ajusta como respuesta a un único comando TPC recibido.



Algoritmo 2: el UE espera a recibir cinco comandos TPC consecutivos, luego, al final de la quinta ranura, el móvil ajusta su potencia de acuerdo a:

- Si los cinco comandos TPC recibidos son “disminuir potencia”, la potencia de transmisión se reducirá en 1dB.
- Si los cinco comandos TPC recibidos son “incrementar potencia”, la potencia de transmisión se incrementará en 1dB.
- Si no se presenta ninguno de los casos anteriores, el móvil no varía su potencia de transmisión.

Tabla 2.2. Rango de control de potencia del transmisor.

Comando TPC	Tamaño de paso:1 dB		Tamaño de paso:2 dB		Tamaño de paso:3 dB	
	Disminuir	Incrementar	Disminuir	Incrementar	Disminuir	Incrementar
+ 1	+0.5 dB	+1.5 dB	+1 dB	+3 dB	+1.5 dB	+4.5 dB
0	-0.5 dB	+0.5 dB	-0.5 dB	+0.5 dB	-0.5 dB	+0.5 dB
-1	-0.5 dB	-1.5 dB	-1 dB	-3 dB	-1.5 dB	-4.5 dB

De igual manera, durante el enlace de bajada el UE estima la SIR del canal físico de control dedicado (DPCCH) del enlace de bajada, para compararla con la SIR objetivo. El UE genera comandos TPC para controlar la potencia de transmisión de la red, y los envía en el campo correspondiente a TPC dentro del canal DPCCH del enlace de subida. Si el UE encuentra que la SIR estimada es mayor que la SIR objetivo, el UE le enviará a la BS un comando TPC de “disminuir potencia”, en caso contrario enviará uno de “incrementar potencia”. De esta manera, el control de potencia de lazo interno en el enlace de bajada proporciona la potencia necesaria a los canales físicos dedicados.

2.3.2 Detección Multiusuario

Esta técnica de detección trata a cada usuario separadamente como una señal, considerando a los demás usuarios como ruido o MAI. Con el uso de esta técnica de Detección Multiusuario (MUD, Multiuser Detection), que incluye el uso de ecualizadores y emplea técnicas de detección conjunta (*Joint Detection*), se mitiga la MAI, permitiendo una detección más eficiente, y por lo tanto un incremento de la capacidad del sistema sin necesidad de un mayor ancho de banda [46]. El MUD tiene la función de detectar la señal del usuario deseada, en presencia de la interferencia generada por otros usuarios [47].

2.3.3 Control de Admisión

El control de admisión (*Admission Control*) es una técnica RMM, que tiene la decisión de aceptar o rechazar las solicitudes de nuevas llamadas, teniendo mayor prioridad los



usuarios que vienen de traspasos, que los usuarios que deseen realizar una nueva conexión, ya que se considera más molesto para un usuario que la llamada se caiga, a que la llamada no se pueda establecer [48]. El control de admisión es necesario para evitar la sobrecarga del sistema. Antes de admitir un nuevo UE en la celda el control de admisión necesita verificar si la admisión de un nuevo usuario o llamada, perjudica la calidad del servicio de las conexiones existentes, debido a la interferencia que produciría. La función de control de admisión se encuentra localizada en el RNC donde se concentra la información sobre las medidas de todas las celdas. Los algoritmos de control de admisión estiman el incremento de carga que podrían provocar las nuevas llamadas o conexiones en la red radio, estas estimaciones deben ser realizadas tanto para el DL como para el UL. La solicitud de admisión es aceptada solo si ambos enlaces la admiten, sino la solicitud será rechazada debido al incremento de interferencia que puede producir sobre la red [49].

2.3.4 Control de Carga (Control de Congestión)

El control de carga (*Load Control*) como técnica RRM tiene la función de no permitir que el sistema se sobrecargue manteniendo su funcionamiento estable. Si el sistema está bien planificado y el control de admisión funciona correctamente, sería extraño que se sobrecargue el sistema, sin embargo, si esto ocurre, el control de carga entraría en acción para normalizar rápidamente el sistema, bajando los niveles de carga hasta un nivel de carga objetivo. Las acciones que puede realizar el control de carga son:

- Control rápido de carga en el DL: Rechaza los incrementos de potencia ordenados por los comandos recibidos desde el UE.
- Control rápido de carga en el UL: Reduce el E_b/N_0 objetivo en el UL usado en el control de potencia rápido.
- Realiza el traspaso del UE a otra portadora WCDMA (interfrecuencia).
- Realiza el traspaso (intersistema) del UE a GSM.

2.3.5 Planificador

Como procedimiento RRM, el planificador (*scheduling*) tiene la función de administrar y asignar dinámicamente el ancho de banda de la red entre las conexiones activas. Se encuentra presente en el RNC, donde determina cuantos paquetes son entregados a cada conexión en un momento dado, dependiendo de mediciones de carga en la interfaz radio realizadas por el Nodo B y de mediciones de volumen de tráfico en el UL. El planificador realiza la asignación analizando el flujo de paquetes de las aplicaciones o los requisitos de calidad de servicio (QoS) [10].

2.3.6 Traspaso de Llamada

El control de traspaso (*Handover Control*) es una técnica RMM que garantiza la continuidad de la llamada durante el proceso de traspaso, al tiempo que facilita la movilidad del usuario a través de las redes de comunicaciones móviles. El traspaso de llamada ocurre cuando un UE que tiene una llamada activa, se encuentra en medio de



dos celdas o dos sectores adyacentes, donde la calidad del enlace se torna ineficiente con uno de los sectores o donde existen mejores condiciones de comunicación ofrecidas por la nueva estación base o sector, eligiendo el que le brinde mejores condiciones con el objetivo de transferir el servicio para continuar la llamada. Durante el proceso de traspaso la estación base y la estación móvil obtienen una ganancia al lograr una E_b/N_0 mayor a la requerida con solo cambiar de enlace [10].

Al igual que el control de potencia, los traspasos de llamada son considerados una herramienta esencial para mitigar la interferencia al controlar el efecto cerca-lejos en los sistemas de telefonía celular.

Dentro de este concepto se definen tres tipos de traspasos: traspaso fuerte, traspaso suave y traspaso más suave.

- Traspaso fuerte (*Hard Handover*): Se define también como traspaso de llamada con interrupción, pues en este proceso el UE se desconecta de la BS original antes de realizar la nueva conexión en una frecuencia diferente, quedando desconectado durante un breve periodo de tiempo, por lo cual este método no es seguro al tener una alta probabilidad de pérdida o caída de llamada. Sin embargo, es un proceso bastante utilizado en sistemas como GSM, pero en WCDMA donde se emplea la misma frecuencia en todo el sistema, es posible establecer la conexión con la nueva BS antes de abandonar por completo a la anterior, por lo cual se manejan los conceptos de traspaso suave y traspaso más suave (*Soft/Softer Handover*) los cuales son más seguros. Cuando se presenta un traspaso entre dos sistemas que operan con estándares diferentes se habla de traspaso de llamada intersistema, y es un ejemplo de traspaso fuerte, como el que puede ocurrir entre WCDMA y GSM, necesario para ofrecer una cobertura continua y disminuir la carga en celdas GSM o WCDMA.
- Traspaso suave (*Soft Handover*): Conocido también como traspaso de llamada sin interrupción o traspaso intercelda, en el cual el UE está conectado simultáneamente a la BS origen y a la BS destino, por lo que no se produce interrupción del enlace, asegurando la continuidad de la comunicación. Este proceso se realiza bajo el protocolo de Traspaso Asistido por el Móvil (MAHO, *Mobile-Assisted Handover*), mecanismo que comparte la decisión de traspaso, ya que el UE realiza las medidas del estado del canal, pero es el RNC quien toma la decisión del traspaso. Este mecanismo asegura la continuidad del servicio a costa de ocupar mayores recursos del sistema, pues se mantiene la misma llamada con dos o más conexiones durante un tiempo. La figura 2.8 [10] muestra el proceso de traspaso suave.

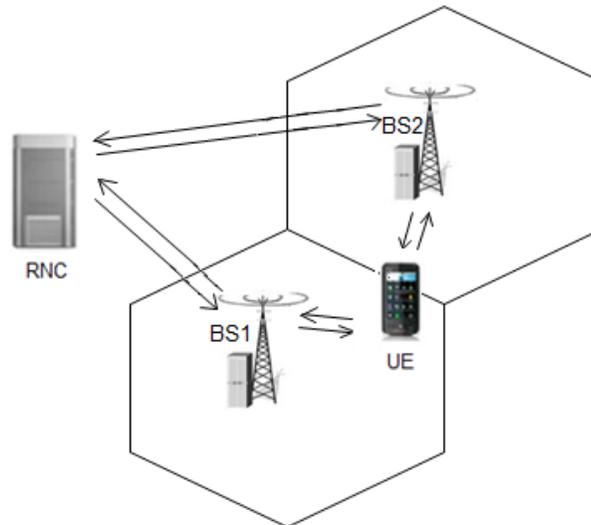


Figura 2.8. Proceso de *soft handover*.

- Traspaso más suave (*Softer Handover*): Denominado también traspaso de llamada sin interrupción intracelda, en el cual el UE realiza un traspaso entre dos sectores de una misma celda, como se muestra en la figura 2.9 [10]. Al igual que en el traspaso suave, el *Softer Handover* se realiza bajo el protocolo MAHO.

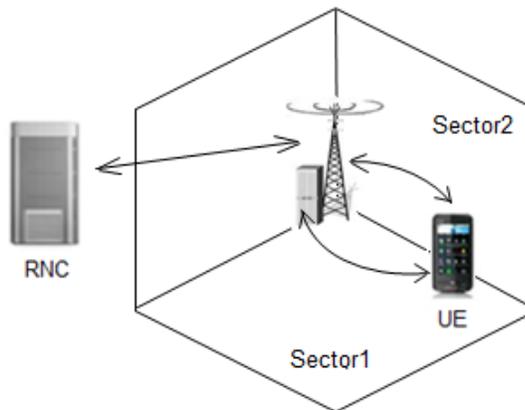


Figura 2.9. Proceso de *softer handover*.

2.3.6.1 Conjunto Activo

El proceso de traspaso suave presenta los conceptos de Conjunto Activo, Conjunto Candidato, Conjunto Vecino o Conjunto de Monitoreo, y Conjunto Detectado, necesarios durante el traspaso de una llamada sin interrupción [50] [51].

- Conjunto Activo (*Active Set*): Conjunto formado por las celdas que en cierto momento están implicadas de manera simultánea en una comunicación, a las cuales una estación móvil o UE se encuentra conectado. Este conjunto se actualiza dinámicamente durante todo el tiempo de la llamada, basándose en la potencia de los canales CPICH de cada una de las celdas. Típicamente, un nodo B estará



dentro del conjunto activo si las pérdidas de trayecto sufridas por su canal piloto están hasta 6 dB por debajo de las pérdidas de trayecto sufridas por el nodo B del conjunto activo cuyo canal piloto tiene el nivel de potencia más alto.

- Conjunto Candidato (*Candidate Set*): Conjunto formado por las celdas que no pertenecen al conjunto activo, pero que han sido percibidas por el UE con un nivel de potencia suficiente, lo que indica que los canales de tráfico asociados (DPDCH y DPCCH) podrían ser demodulados adecuadamente. Este conjunto puede incluir un máximo de seis celdas.
- Conjunto Vecino o de Monitoreo (*Neighbour set/monitored set*): Conjunto formado por las celdas que no pertenecen al conjunto activo ni al conjunto candidato, pero que continúan siendo monitoreadas por el UE, ya que por sus características son celdas o sectores opcionales para hacer un traspaso hacia ellos. Los vecinos son todas las celdas o sectores que se encuentran en la vecindad cercana al móvil. Este conjunto puede contener un máximo de 20 celdas.
- Conjunto Detectado (*Detected Set*): Conjunto formado por las celdas que son detectadas por el UE, pero que no son incluidas en el conjunto vecino.

La figura 2.10 [10] muestra el procedimiento de *Soft Handover* de un UE que se mueve a lo largo de varias celdas; para comprenderlo se deben resaltar los principales conceptos manejados durante el traspaso de la llamada.

- Rango de Reporte (*Reporting Range*) → es el umbral para traspaso de llamada sin interrupción.
- Evento 1A → habilita la adición de celdas en el conjunto activo, cuando la potencia de la señal piloto de una nueva BS es lo suficientemente buena comparada con el piloto de la mejor BS del conjunto activo.
- Evento 1B → habilita la eliminación de celdas en el conjunto activo, cuando la potencia de la señal de una celda no es lo suficientemente buena, es decir, la potencia de su canal piloto está 6 dB por debajo del piloto de la mejor BS del conjunto activo.
- Evento 1C → el piloto más débil del conjunto activo es reemplazado por el piloto con el nivel de potencia más alto del conjunto candidato.

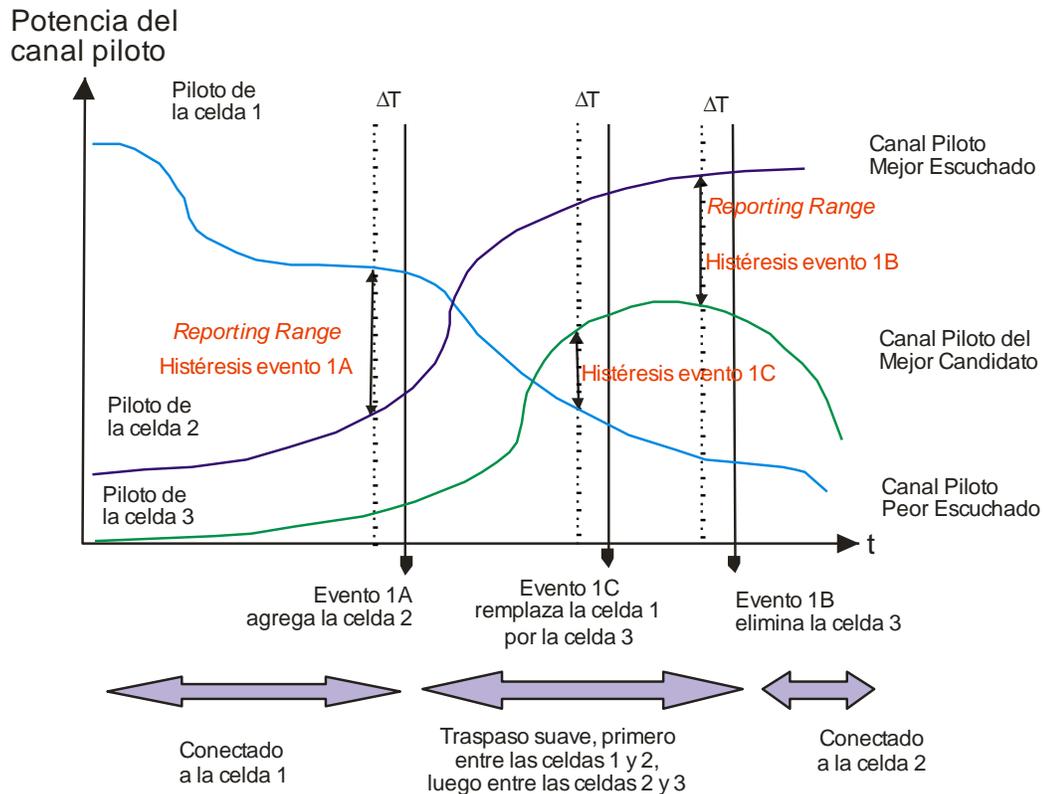


Figura 2.10. Algoritmo de *soft handover*.

2.4 PLANEACIÓN DE COBERTURA Y CAPACIDAD

El proceso de planeación tiene como fin principal cumplir los requerimientos del operador relacionados con cobertura, capacidad y calidad de servicio (QoS). La capacidad y la cobertura están fuertemente relacionadas en las redes WCDMA, por lo tanto ambas deben ser consideradas simultáneamente en el dimensionamiento de la red, además, se encuentran limitadas por la cantidad de tráfico que el Nodo B soporte y por la cantidad de interferencia del sistema. La mayoría de las redes WCDMA se despliegan sobre las redes ya existentes GSM, por lo que se necesita hacer Co-planeación [10].

La selección de los equipos de red, se realizan a partir de los requerimientos del operador relacionados con los siguientes parámetros:

Cobertura.

- Regiones de cobertura.
- Información de las áreas.
- Condiciones de propagación.



Capacidad.

- Espectro disponible.
- Predicciones sobre el crecimiento de usuarios.
- Información de densidad de tráfico.

Calidad de servicio.

- Probabilidad de cobertura.
- Bloqueo suave (*soft capacity*).
- Velocidad de transmisión de datos al usuario.

La capacidad y la cobertura manejan una relación inversamente proporcional, debido a esto, si el operador en sus requerimientos necesita brindar grandes velocidades de transmisión de datos, el área de cobertura se ve limitada.

2.4.1 Ecuaciones que determinan la capacidad

La capacidad de un sistema se refiere a la cantidad de usuarios que pueden compartir simultáneamente el recurso físico del que se dispone (ancho de banda), manteniendo un nivel de calidad adecuado para cada comunicación o servicio. La capacidad analiza la carga de un sistema móvil celular, determinando la cantidad de tráfico que puede soportar un Nodo B. Las evaluaciones y análisis se realizan inicialmente en el UL, en la estación base ya que es un escenario muchos a uno, mientras que en el DL tendría que analizarse la interferencia que afecta a cada usuario. Se debe tener en cuenta que la tecnología WCDMA maneja un reuso de frecuencia igual a 1. Debido a esto se debe estimar la cantidad de interferencia y la capacidad que puede ser entregada a la celda [48].

2.4.1.1 Factor de carga en el UL

El factor de carga estima, la carga del sistema, a partir de mediciones basadas en la potencia recibida de banda ancha o basadas en el *throughput*. En la búsqueda de calcular el factor de carga, se debe definir primero el E_b/N_0 el cual se calcula a partir de las ecuaciones (2.1) y (2.2).

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_j = \text{Ganancia de procesamiento del usuario } j \times \frac{\text{Señal del usuario } j}{\text{Potencia total recibida (excluyendo señal propia)}} \quad (2.1)$$

La ecuación también puede ser escrita de esta manera:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_j = \frac{W}{v_j R_j} \frac{P_j}{I_{Total} - P_j} \quad (2.2)$$

Donde:

- $W \rightarrow$ tasa de chip de WCDMA (cps).



- $v_j \rightarrow$ factor de actividad del usuario j. Representa la actividad de voz de cada usuario.
- $R_j \rightarrow$ velocidad de transmisión de datos del usuario j (bps).
- $P_j \rightarrow$ potencia de la señal recibida del usuario j (W).
- $I_{Total} \rightarrow$ potencia total de banda ancha recibida, incluyendo la potencia de ruido térmico en el Nodo B (W).

Despejando P_j de la ecuación (2.2) se obtiene la ecuación (2.3).

$$P_j = \frac{1}{1 + \frac{(Eb/N0)_j v_j R_j}{W}} I_{Total} = L_j I_{Total} \quad (2.3)$$

Donde L_j es el factor de carga de la conexión del usuario j, tal como aparece en la ecuación (2.4):

$$L_j = \frac{1}{1 + \frac{(Eb/N0)_j v_j R_j}{W}} \quad (2.4)$$

La interferencia total recibida sin tener en cuenta el ruido térmico P_N , puede ser calculada como la suma de potencias recibidas de los N usuarios en una misma celda, tal como aparece en la ecuación (2.5).

$$I_{Total} - P_N = \sum_{j=1}^N P_j = \sum_{j=1}^N L_j I_{Total} \quad (2.5)$$

$$P_N = I_{Total} \left(1 - \sum_{j=1}^N L_j \right) \quad (2.6)$$

El margen de interferencia (*Noise Rise*) se define como la relación entre el total de potencia recibida banda ancha y la potencia de ruido, tal como aparece en la ecuación (2.7). Si la carga del sistema aumenta, el margen de interferencia en el UL lo hace también, reduciendo así el área de cobertura.

$$Noise\ rise = \frac{I_{Total}}{P_N} = \frac{1}{(1 - \sum_{j=1}^N L_j)} = \frac{1}{1 - \eta_{UL}} \quad (2.7)$$

Cuando el factor $\eta_{UL} = 1$ el margen de interferencia (*Noise Rise*) da infinito y el sistema ha alcanzado un polo de capacidad.

Para calcular el factor de carga del sistema se debe tener en cuenta la interferencia desde otras celdas, la cual es tenida en cuenta a través del factor i definido en la ecuación (2.8).



$$i = \frac{\text{interferencia de otras celdas}}{\text{interferencia de la celda propia}} \quad (2.8)$$

Finalmente el factor de carga en el UL se representa por las ecuaciones (2.9) y (2.10).

$$\eta_{UL} = (1 + i) \sum_{j=1}^N L_j = (1 + i) \sum_{j=1}^N \frac{1}{1 - \frac{W}{\left(\frac{Eb}{No}\right) v_j R_j}} \quad (2.9)$$

$$\eta_{UL} = 1 - \frac{P_N}{I_{Total}} \quad (2.10)$$

La ecuación (2.9) es la estimación de carga basada en el rendimiento, mientras que la ecuación (2.10) se basa en la estimación de las potencias recibidas de banda ancha.

2.4.1.2 Factor de carga en el DL

El factor de carga en el DL maneja situaciones más complejas que en el UL (sin embargo las limitaciones más grandes al sistema vienen dadas por el análisis en el UL). Esas situaciones son:

- Múltiples puntos de recepción en el DL Vs único punto de recepción (Nodo B) en el UL.
- Combinación en el DL Vs selección en el UL¹⁶.
- Interacción (DL) de usuarios Vs independencia (UL).

El factor de carga en el DL se calcula de cierta manera similar al del UL, teniendo en cuenta un nuevo parámetro, el factor de ortogonalidad, tal como aparece en la ecuación (2.11).

$$\eta_{DL} = \sum_{j=1}^N v_j \cdot \frac{\left(\frac{Eb}{No}\right)_j}{W/R_j} \cdot [(1 - \alpha_j) + i_j] \quad (2.11)$$

Donde el parámetro α_j representa el factor de ortogonalidad para el enlace de bajada. Se debe tener en cuenta que WCDMA trabaja con códigos ortogonales en el DL para separar a los usuarios, sin embargo, en el trayecto desde el Nodo B al UE las señales se propagan a través de diferentes trayectos, fenómeno que afecta la ortogonalidad entre códigos [10].

¹⁶ La combinación en el DL, se presenta cuando un UE logra demodular más de una señal proveniente de los Nodos B, mejorando así el nivel de potencia en recepción. La selección en el UL, se presenta cuando un UE que logra escuchar la señal de más de un Nodo B, selecciona a solo uno para establecer la comunicación [12].



Si los usuarios son perfectamente ortogonales, el parámetro α es igual a 1, haciendo que el cálculo para el factor de carga en el DL sea igual que para el del UL, pero, si se tienen componentes de multitrayecto, ese parámetro varía entre $0.4 \leq \alpha \leq 0.9$.

Por otro lado si en el canal radio existe suficiente dispersión de retardo¹⁷ (*Delay Spread*), el UE verá parte de la señal del Nodo B como Interferencia de Acceso Múltiple (MAI). La MAI genera un incremento del margen de interferencia [52].

En el DL la relación de interferencia de otras celdas a la propia, depende de la localización de los usuarios y por lo tanto es diferente para cada usuario, tal como aparece en la ecuación (2.12).

$$\bar{\eta}_{DL} = \sum_{j=1}^N v_j \frac{\left(\frac{Eb}{No}\right)_j}{R_j} [(1 - \bar{\alpha}_j) + \bar{\iota}] \quad (2.12)$$

Donde los parámetros pueden tomar distintos valores, dependiendo del escenario en que se encuentre el UE, algunos de estos se muestran en la tabla 2.3 [10].

Tabla 2.3. Valores de los parámetros en una transmisión de voz.

v_j	0.58 para voz, asumiendo actividad de voz= 50% y encabezado DPCCH para Transmisión Discontinua (DTX, <i>Discontinuous Transmission</i>).
α_j	Depende de la propagación multitrayecto. 1: Totalmente ortogonal. 1 trayecto. $0.4 \leq \alpha \leq 0.9$ Con canales multitrayecto. 0: No ortogonal.
$\bar{\alpha}_j$	Canal A vehicular ITU: ~50%. Canal A transeúnte ITU: ~90%.
$\bar{\iota}$	Macrocelas con antenas omnidireccionales: 55%. Macrocelas con tres sectores: 65%.
W	Tasa de chip = 3.84 Mcps.
R_j	Tasa de bit del usuario j: 12.2Kbps para voz.

¹⁷ La dispersión de retardo mide la diferencia entre el tiempo de llegada de la primera componente multitrayecto (típicamente es la componente de línea de vista) y el tiempo de llegada de la última componente multitrayecto [10].



3

MODELOS DE PROPAGACIÓN Y ANÁLISIS DE COBERTURA

3.1 INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de grado se analiza la interferencia en una femtocelda WCDMA y el efecto de introducirla dentro del área de cobertura de una microcelda de la misma tecnología, por lo cual se construye un entorno donde las señales sufren pérdidas a lo largo de su propagación, siendo necesario hacer uso de un modelo de propagación que estime dichas pérdidas con el fin de facilitar el estudio del sistema y el análisis de capacidad y cobertura, aspectos dinámicos dependientes de la interferencia presente en el sistema en un momento dado. Los modelos de predicción de propagación involucran características del escenario desplegado, además, tienen en cuenta las características generales de los equipos a ser utilizados, tales como los niveles máximos con que los equipos terminales de usuario pueden transmitir, la sensibilidad de la estación base, y las ganancias de las respectivas antenas. Adicionalmente, algunos modelos tienen en cuenta los efectos de desvanecimiento por sombra y de desvanecimiento rápido debido al multirayecto. De esta manera se busca estimar, con una adecuada precisión, la cobertura que una celda puede brindar a un sistema, teniendo en cuenta ganancias, atenuaciones y pérdidas en la transmisión de la señal.

En este capítulo se realiza un análisis de los principales modelos de propagación con el fin de determinar cuál es el indicado para los objetivos del presente trabajo de grado. Posteriormente, se realiza el balance de un enlace donde se aplica el modelo de propagación seleccionado, para determinar de manera general los efectos de la carga o interferencia sobre la cobertura del sistema.

3.2 MODELOS DE PROPAGACIÓN

Los modelos de propagación y los métodos de predicción constituyen un conjunto de expresiones matemáticas y algoritmos empleados para representar un ambiente radioeléctrico y sus características más significativas. Los modelos de propagación y los



métodos de predicción son importantes en el momento de realizar la planeación y el diseño de sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricas, en los cuales se deben garantizar características que aseguren la comunicación y la calidad de la misma, tales como:

- Nivel de señal deseada.
- Nivel de interferencia.
- Relación S/N, C/N o C/I.
- Porcentaje de cobertura temporal y espacial

Además, los modelos de propagación y los métodos de predicción tienen en cuenta fenómenos importantes como la reflexión de las señales en el suelo, las paredes de los edificios u otros obstáculos, la posibilidad de difracción sobre los objetos próximos al equipo de usuario, y las condiciones de atenuación de la señal dada la frecuencia de trabajo del sistema, los cuales, de manera general, representan las pérdidas de propagación y las pérdidas por penetración en edificios y obstáculos, sufridos por las señales [12] [53].

La efectividad de un modelo se determina por la predicción acertada o aproximada de sus resultados al ser comparados con las medidas obtenidas en el campo real, mientras que su aplicación depende de las características del entorno a analizar, las cuales pueden ser:

- Tipo de terreno: montañoso, ondulado, plano.
- Características del escenario de propagación: área urbana o rural, zona abierta o de interiores, etc.
- Características de la atmosfera: índice de refracción, intensidad de lluvias, presencia o ausencia de nubes, etc.
- Propiedades eléctricas del suelo: conductividad terrestre.

3.2.1 Clasificación de los Modelos de Propagación

De manera general, los modelos de propagación o métodos de predicción se clasifican en determinísticos o teóricos, empíricos o estadísticos, y una combinación de ambos: los semi-empíricos [54]. Los modelos determinísticos se basan en los principios fundamentales de los fenómenos de propagación de las ondas electromagnéticas, mediante los cuales se predicen las pérdidas sufridas por una señal durante su propagación entre un terminal transmisor y un receptor. Los modelos empíricos se basan en realizar mediciones en el ambiente de propagación durante un tiempo considerable, con el fin de proporcionar una estimación rápida de las pérdidas básicas o de la intensidad de campo en cualquier punto alrededor de un transmisor; su uso es sencillo, pero su exactitud puede no ser muy buena por los constantes cambios que experimenta el canal de radio. Los modelos semi-empíricos permiten combinar la información teórica con mediciones realizadas al ambiente de propagación, con lo cual se logra un mejor análisis acerca de lo que efectivamente sucede en el campo real.



Dentro de los modelos empíricos se destacan: Lee, Okumura-Hata, Ikegami, Walfish-Bertoni, COST 231, Sakagami-Kuboi, Longley-Rice, entre otros [53].

- Lee: Modelo basado en el modelo de tierra plana¹⁸ que puede aplicarse en entornos suburbanos y urbanos. La frecuencia de trabajo es de 900 MHz, y se consideran alturas de antenas de transmisión y recepción de 30.5 m y 3 m, respectivamente.
- Okumura-Hata: Modelo concebido para radiocomunicaciones móviles en entornos urbanos, suburbanos y rurales, proporciona valores de la intensidad de campo eléctrico considerando bandas de frecuencia de 150, 450 y 900 MHz, altura de antena en recepción entre 1 m y 10 m y en transmisión entre 30 y 200 m, y distancias entre 1 Km y 20 Km.
- Ikegami: Modelo basado en la teoría de rayos y la óptica geométrica para calcular la potencia media en zonas urbanas. Este modelo considera una estructura ideal de la ciudad a analizar con alturas uniformes de los edificios y tiene en cuenta la orientación de calles, la frecuencia, la distancia y la altura de la antena transmisora. Este modelo proporciona buenos resultados de predicción cuando la altura de la antena de la BS está por encima de la altura promedio de los edificios, por lo que solo se considera la influencia de las construcciones inmediatas al terminal receptor.
- Walfish-Bertoni: Modelo que tiene en cuenta la influencia del conjunto de edificios y se suponen áreas con distribución uniforme de edificios altos, con bordes angulares y en filas casi paralelas. Se aplica para alturas no muy elevadas de antena transmisora por encima de los edificios próximos. El modelo es válido para valores de frecuencia entre 300 MHz y 3 GHz y una distancia transmisor - receptor entre 200 m y 5 Km.
- Sakagami-Kuboi: Modelo desarrollado en Japón válido para entornos urbanos y bandas de frecuencia de 900 y 1800 MHz. Requiere información detallada del entorno del móvil.
- Longley-Rice: Modelo útil en sistemas de radiocomunicaciones móviles y de difusión, el cual tiene en cuenta la rugosidad del terreno. El modelo se aplica para sistemas que operan en frecuencias entre 20 MHz y 40 GHz y distancias transmisor – receptor entre 1 Km y 2000 Km. Su aplicación resulta compleja en cuanto el modelo requiere fuentes confiables de información acerca de mapas digitalizados de buena resolución propios del terreno a analizar.

¹⁸ El modelo de propagación de tierra plana desprecia la curvatura de la Tierra y es aplicable para distancias menores a 20Km [53].



- COST 231: Modelo desarrollado con el fin de mejorar las predicciones que se obtienen a partir de otros modelos. Por un lado se tiene la adaptación al modelo de Okumura-Hata, denominado modelo COST 231-Hata, mientras que por el otro se hace una combinación de los modelos de Walfish e Ikegami, lo que constituye el modelo COST 231 Walfish-Ikegami.

El modelo COST 231-Hata incluye características del entorno de una ciudad media, en áreas suburbanas, o grandes centros metropolitanos, el cual extiende el rango de aplicación en frecuencia hasta 2000 MHz.

El modelo COST 231 Walfish-Ikegami es aplicable tanto en entornos de celdas grandes como en entornos microcelulares. En el primer caso se considera la antena del transmisor ubicada por encima de los tejados de los edificios, por lo cual las pérdidas de propagación están determinadas por la difracción y la reflexión en los tejados de los edificios cercanos al receptor. Para el caso de las microceldas, la antena se ubica por debajo de los tejados, por lo cual se tiene en cuenta la propagación y la reflexión alrededor de los edificios, considerando los rayos principales propagándose en las calles como lo harían en una guía de onda (efecto cañón). De manera general, el modelo COST 231 Walfish-Ikegami ha sido validado para las frecuencias entre 900 y 1800 MHz y distancias entre 10 m y 30 Km.

Debido a que el presente trabajo analizará, por medio de una simulación estática a nivel de sistema, la interferencia presentada en una femtocelda y el efecto de introducirla dentro del área de cobertura de una microcelda, se deben considerar los entornos de propagación propios de los sistemas microcelulares, donde se cumplen características de una cobertura reducida y alturas de antenas de los nodos B situadas por debajo de la altura promedio de los edificios (alrededor de los 10 m por encima del suelo). Además, se deben tener en cuenta fenómenos importantes como la reflexión de las señales en el suelo, las paredes de los edificios u otros obstáculos, la posibilidad de difracción sobre los objetos próximos al equipo de usuario, y las condiciones de atenuación de la señal dada la frecuencia de trabajo del sistema¹⁹, los cuales, de manera general, representan las pérdidas de propagación y las pérdidas por penetración en edificios y obstáculos, sufridos por las señales [12] [53].

Como se analizó en el capítulo 1, las femtoceldas representan pequeñas estaciones base denominadas Nodos B de Hogar (HNB, *Home Node B*) que alcanzan un radio de cobertura que va de 10 a 150 m aproximadamente, las picoceldas tienen un radio entre 70 y 250 m, mientras que las microceldas alcanzan entre 300 m y 700 m. Estos valores son tenidos en cuenta al momento de seleccionar el modelo de propagación más adecuado, el

¹⁹ A partir de los 10GHz los sistemas de comunicaciones inalámbricos se ven afectados por la absorción en la ionosfera de la señal, dado que la longitud de onda de ésta es de tamaño comparable a las partículas de agua, por lo cual se deben considerar este tipo de pérdidas.



cual permitirá analizar los efectos de las pérdidas sufridas por la señal, facilitando el dimensionamiento de la capacidad y cobertura del sistema.

Por tal motivo, el estudio de la propagación en los entornos microcelulares no puede realizarse a través de los modelos antes vistos, en los cuales generalmente se consideran distancias del orden de los kilómetros y alturas de antenas del nodo B mayores que la de los edificios circundantes en la mayoría de los casos, características que no coinciden con las del entorno que se establece en este trabajo de grado. El método COST 231 incluye el caso de entornos microcelulares, sin embargo, las mediciones obtenidas a partir de ese modelo presentan errores de predicción considerables, respecto a los modelos de propagación desarrollados para estos entornos, donde se relacionan las pérdidas con la distancia y con las características geométricas del contexto [12].

Los métodos de predicción para escenarios interiores (*indoor*) analizan las pérdidas de propagación de una señal dentro de un edificio en particular, por lo cual dichas pérdidas dependen de las características de la construcción tales como el número de paredes y pisos que la señal debe atravesar y el material de construcción, entre otros, con el fin de establecer un factor de atenuación que se basa en el número y tipo de obstáculos. De manera general, en el estudio de este tipo de entornos se recurre a la Teoría Geométrica de la Difracción (GTD, *Geometric Theory of Diffraction*), donde se aplican técnicas de trazado de rayos (*Ray Tracing*) [12].

Sin embargo, los modelos que se aplican para la predicción de pérdidas de propagación de los ambientes interiores no son los adecuados para aplicar en el presente trabajo de grado, por lo cual se determina que los modelos propios de los entornos microcelulares son los aplicables al escenario que se propone en el presente trabajo de grado.

3.3 MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA ENTORNOS MICROCELULARES

Como se consideró anteriormente, el análisis de la predicción de pérdidas de propagación del escenario de simulación, se lleva a cabo a partir de las consideraciones acerca de entornos microcelulares, razón por la cual se estudian los modelos desarrollados para tales entornos. De manera general, dentro de los escenarios microcelulares se consideran los efectos que las estructuras tienen sobre la señal, donde las calles pueden hacer las veces de guías de onda mientras que las esquinas y fachadas de los edificios representan puntos donde la señal se difracta. Debido a ello, teórica y empíricamente se han definido dos modos de propagación: por un lado se considera una comunicación en condiciones de línea de vista (LOS, *Line of Sight*) o de visión directa entre un terminal transmisor y un receptor, mientras que por el otro se analiza una comunicación que no tiene línea de vista (NLOS, *No Line of Sight*), donde se consideran zonas con obstáculos en las que la potencia señal se ve disminuida en mayor proporción por penetrar un edificio y sufrir los fenómenos de reflexión y difracción hasta llegar al receptor [53].

El Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*) ha definido cuatro tipos de ambientes para entornos microcelulares [4], los cuales son:



- Ambiente de interior (*Indoor office environment*).
- Ambiente mixto peatonal (*Outdoor to indoor and pedestrian environment*).
- Ambiente vehicular (*Vehicular environment*).
- Ambiente mixto peatonal/vehicular (*Mixed-cell pedestrian/vehicular environment*).

El ambiente mixto peatonal es el más apropiado para ser aplicado en la simulación por las condiciones generales asumidas, donde se tienen usuarios transeúntes que se mueven a velocidades de 3 Km/h aproximadamente en entornos tanto exteriores como interiores, por lo cual se selecciona este ambiente para ser desarrollado a lo largo de este trabajo de grado.

3.3.1 Ambiente Mixto Peatonal

Este ambiente de entorno microcelular se caracteriza por celdas pequeñas, con potencias de transmisión relativamente bajas. Las antenas de los nodos B están situadas a bajas alturas en el exterior de las edificaciones; los usuarios transeúntes pueden localizarse en las calles o en el interior de residencias o edificios [55].

Antes de desarrollar el modelo de propagación que analiza las pérdidas de trayecto para este ambiente en particular, inicialmente se estudian las ecuaciones basadas en la teoría básica de la transmisión electromagnética donde se definen las pérdidas de espacio libre tal como aparece en la ecuación (3.1).

$$l_0 = \left[\frac{4\pi d}{\lambda} \right]^2 \quad (3.1)$$

Donde:

- d → distancia desde el transmisor al punto de medida, en metros.
- λ → longitud de onda de propagación, en metros.

Transformando la ecuación (3.1) en unidades logarítmicas y expresando la longitud de onda en términos de la relación existente entre la velocidad de la luz (c) y la frecuencia (f), se obtiene la ecuación (3.2).

$$10\log(l_0) = 20 \log \left[\frac{4\pi d f}{c} \right] \quad (3.2)$$

Fórmula que se puede escribir tal como aparece en la ecuación (3.3), denominada también fórmula de pérdidas de trayecto de espacio libre o fórmula de Friss.

$$L_0[dB] = 32.45 + 20 \log(d[Km]) + 20 \log(f[MHz]) \quad (3.3)$$

Donde:

- d → distancia desde el transmisor al receptor en kilómetros.
- f → frecuencia en megahertz (MHz).

Las pérdidas de espacio libre de la ecuación (3.3) asumen que no existen obstáculos entre el transmisor y el receptor donde la señal se pueda reflejar, difractar o dispersar, y aplican el principio de propagación de onda desde un radiador isotrópico. Esta fórmula de pérdidas de espacio libre representa un concepto fundamental a partir del cual se



desarrollan las ecuaciones propias de cada uno de los modelos descritos anteriormente, al incluir diferentes coeficientes y factores que permiten el desarrollo de un modelo en particular.

Dentro del ambiente de propagación mixto peatonal (*Outdoor to indoor and pedestrian*) se define la ecuación (3.4) para determinar las pérdidas de trayecto.

$$L[dB] = 49 + 40 \log(d[Km]) + 30 \log(f[MHz]) \quad (3.4)$$

Donde:

- d → distancia entre el transmisor y el receptor en kilómetros.
- f → frecuencia de la portadora en megahertz (MHz).

NOTA: Las pérdidas L obtenidas a partir de la ecuación (3.4) no deberán ser menores a las obtenidas a partir de la ecuación (3.3) o pérdidas de espacio libre bajo ninguna circunstancia. Este modelo solo es válido para comunicaciones que no tienen línea de vista (NLOS) y describe una propagación en el peor de los casos. Se asume un desvanecimiento por sombra (modelado por una distribución log-normal) con una desviación estándar de 10 dB para exteriores y de 12 dB para interiores. Se consideran en promedio pérdidas por penetración en edificios de 12 dB, con una desviación estándar de 8 dB. Este modelo fue desarrollado para evaluar la cobertura y la capacidad de un sistema microcelular de manera simple.

3.4 DIMENSIONAMIENTO DE UN RADIOENLACE

Para comprender los resultados obtenidos con el modelo presentado anteriormente, se desarrolla a manera de ejemplo el balance de un enlace a partir del cual se obtiene el valor de la distancia máxima que define el radio de cobertura alcanzado por una celda, asumiendo las siguientes características:

- Servicio de voz a 12.2 Kbps.
- Tasa de Chip: 3.84 Mcps.
- Entorno microcelular urbano.
- No se presentan traspasos suaves o continuos²⁰ (No ganancia por SHO).
- Velocidad del móvil de 3 km/h (se considera margen de desvanecimiento rápido²¹).
- Factor de Carga: 50%

²⁰ La simulación a nivel de sistema desarrollada en este trabajo de grado no considera traspasos continuos dado que la simulación es estática (sin evolución temporal), por lo cual cada usuario se considera conectado a un único nodo B durante el instante de tiempo de observación.

²¹ Se debe considerar el margen de desvanecimiento rápido (también conocido como *Power Control Headroom*) en el balance de enlace, pues se busca determinar el alcance o cobertura del sistema en el peor de los casos. En la simulación a nivel de sistema el margen de desvanecimiento rápido puede ser incluido en el valor de E_b/N_0 establecido como objetivo, o presentado como un factor aleatorio generado mediante la distribución de *Rayleigh*.



El análisis se realiza para una comunicación en el enlace de subida (UL), teniendo en cuenta que la cobertura se limita durante este enlace mientras que la capacidad del sistema se limita en el enlace de bajada [10]. La frecuencia de operación para el UL es 1920 MHz.

Transmisor: Equipo de usuario (UE), terminal de voz clase 4
Potencia máxima de transmisión, $P_{Tx} = 21\text{dBm}$
Pérdidas de cuerpo (*Body Loss*), $L_{Tx} = 3\text{dB}$
Ganancia de antena, $G_{Tx} = 0\text{dBi}$

Receptor: Nodo B
Ganancia de antena, $G_{Rx} = 3\text{dBi}$
Figura de ruido, $NF = 5\text{dB}$
Pérdidas por conexión (*Cable Loss*), $L_{Rx} = 2\text{dB}$

- Transmisor (UE):

El cálculo de la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (EIRP, *Equivalent Isotropic Radiated Power*) o PIRE, se indica en la ecuación (3.5).

$$PIRE[\text{dBm}] = P_{Tx}[\text{dBm}] + G_{Tx}[\text{dBi}] - L_{Tx}[\text{dB}] \quad (3.5)$$

$$PIRE[\text{dBm}] = 21 \text{ dBm} + 0 \text{ dBi} - 3 \text{ dB} = 18 \text{ dBm}$$

- Receptor (nodo B):

La sensibilidad del receptor²² se indica en la ecuación (3.6), a partir de la cual se determina el nivel mínimo de señal que puede llegar al nodo B proveniente de un móvil. A partir de este valor se calcula la distancia máxima de separación entre el UE y el nodo B, valor que representa el radio de cobertura de una celda.

$$S_{Rx} = \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{Req} - PG[\text{dB}] + \left(Pn_{Rx} \left[\frac{\text{dBm}}{\text{Hz}}\right] + \text{Noise rise}[\text{dB}]\right) \quad (3.6)$$

Donde:

→ E_b/N_o requerido es de 8.3 dB para una comunicación de voz a una velocidad de transmisión de 12.2 Kbps, para un sistema sin diversidad de antena en recepción, sobre un canal AWGN y para un valor de BLER $< 10^{-2}$ [19].

→ Ganancia de Procesamiento (PG, *Processing Gain*):

²² La sensibilidad de un receptor es el nivel mínimo de señal que debe aplicarse a la entrada de un receptor, en condiciones determinadas, para obtener a la salida una señal con una calidad especificada [16].



$$PG[dB] = 10 \log \left(\frac{\text{Tasa de Chip}}{\text{Tasa de Bit}} \right) \quad (3.7)$$

$$PG[dB] = 10 \log \left(\frac{3840000}{12200} \right) = 24.98 \text{ dB}$$

→ Potencia de ruido térmico en el receptor:

$$pn_{Rx} = k[W/^{\circ}K/Hz] * t_0[^{\circ}K] * b[Hz] * NF \quad (3.8)$$

Donde,

$k = 1.3806504 \times 10^{-23} [W/^{\circ}K/Hz]$. Constante de Boltzmann.

$t_0 = 290 [^{\circ}K]$. Temperatura de ruido.

$b = 3840000 [Hz]$. Ancho de banda en un sistema WCDMA en modo FDD.

$NF = 3.1622$. Factor de Ruido, denominado en unidades logarítmicas figura de ruido.

Resolviendo la ecuación (3.8), se obtiene el siguiente valor:

$$pn_{Rx} = 4.8617 * 10^{-14} [W] = 4.8617 * 10^{-11} [mW]$$

Equivalente en unidades logarítmicas a:

$$Pn_{Rx}[dBm] = -103.16 \text{ dBm}$$

→ *Noise Rise* (Margen de Interferencia). Como se observó en el capítulo 2, este margen se calcula a partir de la ecuación (3.9) (factor de carga del 50% $\eta_{UL} = 0.5$).

$$\text{Noise Rise}[dB] = 10 \log \left(\frac{1}{1 - \eta_{UL}} \right) = 3 \text{ dB} \quad (3.9)$$

Reemplazando la ecuación (3.6) se tiene:

$$\begin{aligned} S_{Rx} &= 8.3 \text{ dB} - 25 \text{ dB} + (-103.16 \text{ dBm} + 3 \text{ dB}) \\ S_{Rx} &= -116.84 \text{ dBm} \end{aligned}$$

Las máximas pérdidas de trayecto $L_{trayecto}$ se obtienen a partir de la ecuación general de balance de enlace (ecuación 3.11), donde la potencia de recepción se considera para este caso el nivel mínimo de señal que puede escuchar el receptor, es decir, el valor determinado por la sensibilidad del mismo.

$$S_{Rx} = PIRE - L_{trayecto} + G_{Rx} - L_{Rx} - M_{desv} \quad (3.10)$$

Despejando se tiene,

$$L_{trayecto} = PIRE - S_{Rx} + G_{Rx} - L_{Rx} - M_{desv} \quad (3.11)$$



Donde,

- Margen de desvanecimiento Rápido (FFM, *Fast Fading Margin*): Se conoce también como *Power Control Headroom*, necesario para mantener un adecuado control de potencia rápido en control de lazo cerrado. Se asume este margen dado que los usuarios son transeúntes que se mueven a 3 Km/h, siendo necesario compensar los efectos del desvanecimiento rápido que afecta en mayor medida cuanto menor es la velocidad a la que se mueve el móvil [10]. $M_{desv} = 4dB$

$$L_{trayecto} = 18 dBm + 116.84 dBm + 3 dBi - 2 dB - 4 dB$$

$$L_{trayecto} = 131.84 dB$$

Las Máximas Pérdidas de Trayecto Permitidas (MAPL, *Maximum Allowed Propagation Loss*) especifican el valor máximo de las pérdidas de trayecto que un sistema puede tolerar, garantizando el servicio con las especificaciones de calidad requeridas, por ello dentro de las MAPL se deben incluir aspectos como: ganancias por *Soft Handover* (G_{SHO}) o traspaso suave o continuo, margen de desvanecimiento Log-Normal (M_{LN}), pérdidas por encontrarse dentro de un automóvil (L_{carro}), dentro de un edificio o aquellos efectos que atenúan la señal. La fórmula que describe las MAPL de manera general es:

$$MAPL = L_{trayecto} - M_{LN} + G_{SHO} - L_{carro} \quad (3.12)$$

Pero, dado que en el presente ejemplo, así como en la simulación a nivel de sistema, no se consideran traspasos de llamada, no hay ganancias por *Soft Handover*. De igual manera, el concepto de margen de desvanecimiento Log-Normal y las pérdidas por sombra se encuentran incluidas en el modelo de propagación seleccionado; además, no se consideran pérdidas por vehículo, pues, se analiza el caso de un usuario transeúnte que se mueve a una velocidad de 3 Km/h.

Por lo tanto y haciendo uso de la ecuación (3.12), se tiene:

$$MAPL = L_{trayecto} = 131.84 dB$$

Aplicando el modelo de propagación del ambiente mixto peatonal “*outdoor to indoor and pedestrian*” de la ecuación (3.4) se tiene:

$$L = 49 + 40 \log(d) + 30 \log(1920)$$

$$131.86 = 49 + 40 \log(d) + 98.5$$

Despejando se tiene:

$$\log(d) = \frac{131.84 - 49 - 98.5}{40} = -0.3915$$

$$d = 10^{-0.3915} = 0.40589 Km$$



$$d = 405.89 \text{ m}$$

Donde d es el valor de la distancia máxima a la que puede encontrarse un UE y aún ser escuchado por el nodo B, de tal manera que se pueda mantener una llamada con las especificaciones de calidad requeridas por el servicio.

A manera de resumen del ejemplo desarrollado, se presenta la tabla 3.1, donde se evalúa la distancia máxima de cobertura de un sistema WCDMA para un servicio de voz a 12.2 Kbps.

Tabla 3.1. Balance de enlace de un servicio de voz a 12.2 Kbps.

Transmisor (UE)	Potencia máxima de transmisión [dBm]	21	a
	Ganancia de antena [dBi]	0	b
	Pérdidas de cuerpo [dB]	3	c
	PIRE [dBm]	18	$d = a + b - c$
Receptor (BS)	Densidad espectral de potencia de ruido térmico [dBm/Hz]	-174	e
	Ganancia de antena [dBi]	3	f
	Pérdidas por conexión [dB]	2	g
	Figura de ruido [dB]	5	h
	Densidad espectral de potencia de ruido térmico en el receptor [dBm/Hz]	-169	$i = e + h$
	Potencia de ruido en el receptor [dBm]	-103.16	$j = i + 10\log(3840000)$
	Factor de carga	0.5	k
	Margen de interferencia (<i>Noise Rise</i>) [dB]	3	$l = 10 \log (1/(1-k))$
	Ganancia de procesamiento [dB]	24.98	$m = 10\log(3840000/12200)$
	Eb/No requerido [dB]	8.3	n
	Sensibilidad del receptor [dBm]	-116.84	$o = n - m + j + l$
	Margen de desvanecimiento rápido [dB]	4	p
	Máximas pérdidas de trayecto [dB]	131.84	$q = d - o + f - g - p$
	Ganancia de <i>Soft Handover</i> [dB]	0	r
Máximas pérdidas de trayecto permitidas (MAPL) [dB]	131.84	$s = q + r$	
Aplicación del modelo: Ambiente mixto peatonal	$L[\text{dB}] = 49 + 40 \log (d[\text{Km}]) + 30 \log (f[\text{MHz}])$	131.84	s
	Frecuencia de operación UL [MHz]	1920	t
	Distancia máxima de cobertura [Km]	0.40589	$u = 10^{((131.86 - 49 - 30\log(1920))/40)}$



Del mismo modo, se presenta la tabla 3.2 donde se muestran los radios de cobertura alcanzados para sistemas con diferentes velocidades de transmisión de datos, para un equipo terminal de usuario clase 3.

A partir de la tabla 3.2 se observa la relación entre velocidad de transmisión de datos y cobertura máxima del sistema para un factor de carga del 50%, en donde a mayor velocidad menor será el radio de cobertura, esto debido a los requerimientos de calidad específicos de cada comunicación, los cuales incrementan cuanto mayor es la velocidad de transmisión de datos, notando el compromiso entre capacidad y cobertura como factores inversamente proporcionales.

Tabla 3.2. Distancias máximas de cobertura para diferentes velocidades.

Servicio de Datos	Velocidad de transmisión de datos [Kbps]	64	114	384
Transmisor (UE)	Potencia máxima de transmisión [dBm]	24	24	24
	Ganancia de antena [dBi]	0	0	0
	Pérdidas de cuerpo [dB]	0	0	0
	PIRE [dBm]	24	24	24
Receptor (BS)	Densidad espectral de potencia de ruido térmico [dBm/Hz]	-174	-174	-174
	Ganancia de antena [dBi]	3	3	3
	Pérdidas por conexión [dB]	2	2	2
	Figura de ruido [dB]	5	5	5
	Densidad espectral de potencia de ruido térmico en el receptor [dBm/Hz]	-169	-169	-169
	Potencia de ruido del receptor [dBm]	-103.16	-103.16	-103.16
	Factor de carga	0.5	0.5	0.5
	Margen de interferencia (Noise Rise) [dB]	3	3	3
	Ganancia de procesamiento [dB]	17.78	14.26	10.00
	Eb/No requerido [dB]	4.8	4	4.1
	Sensibilidad del receptor [dBm]	-113.14	-110.42	-106.06
	Margen de desvanecimiento rápido [dB]	4	4	4
	Máximas pérdidas de trayecto [dB]	134.14	131.42	127.06
	Ganancia de Soft Handover [dB]	0	0	0
	Máximas pérdidas de trayecto permitidas (MAPL) [dB]	134.14	131.42	127.06
Aplicación del modelo: Ambiente mixto peatonal	$L = 49 + 40 \log (d[\text{Km}]) + 30 \log (f[\text{MHz}])$	134.14	131.42	127.06
	Frecuencia de operación UL [MHz]	1920	1920	1920
	Distancia máxima de cobertura [Km]	0.46340	0.39620	0.30826



De igual manera se presenta la tabla 3.3 donde se comparan las distancias máximas de cobertura alcanzadas por el sistema a diferentes porcentajes de carga, para una velocidad de transmisión de 12.2 Kbps.

Tabla 3.3. Distancias máximas de cobertura para diferentes factores de carga y diferentes velocidades de transmisión de datos de referencia.

Factor de carga		10%	25%	50%	75%	90%
12.2 Kbps	MAPL [dB]	134.38	133.59	131.83	128.82	124.84
	Distancia máxima de cobertura [Km]	0.46986	0.44893	0.40565	0.34111	0.27128
64 Kbps	MAPL [dB]	133.18	132.39	130.63	127.62	123.64
	Distancia máxima de cobertura [Km]	0.43855	0.41901	0.37861	0.31838	0.25319
144 Kbps	MAPL [dB]	129.66	128.87	127.11	124.10	120.12
	Distancia máxima de cobertura [Km]	0.35807	0.34212	0.30914	0.25995	0.20673
384 Kbps	MAPL [dB]	125.40	124.61	122.85	119.84	115.86
	Distancia máxima de cobertura [Km]	0.28021	0.26772	0.24191	0.20342	0.16178

De la tabla 3.3 se observa que el aumento del factor de carga de la red reduce la distancia máxima de cobertura de la celda. De manera general, un sistema se encuentra más cargado cuando incrementa el número de usuarios que tienen llamadas activas, causando así un incremento en la interferencia total del sistema, haciendo que los niveles de potencia de los UE sean más elevados. Del mismo modo, se observa que el incremento en la velocidad de transmisión de datos, reduce considerablemente el radio de cobertura de todo el sistema, ya que implica aumentar el valor de SIR objetivo requerido.



4

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado enfoca sus esfuerzos en el análisis del desempeño de un sistema WCDMA en términos de capacidad y cobertura, donde interactúa una microcelda con una femtocelda evaluando el efecto de la interferencia, donde la estimación y control de la potencia transmitida juega un papel fundamental en el momento de satisfacer los objetivos de calidad requeridos por cada usuario.

Con el fin de realizar un control de potencia ideal, se ha dispuesto una simulación básica estática a nivel de sistema que permite la obtención de resultados y visualización de los efectos de la interferencia sobre la capacidad y cobertura del sistema. El presente capítulo muestra el diseño, desarrollo de dicha simulación y el análisis de resultados.

4.2 METODOLOGÍA DE DESARROLLO

La construcción de un escenario de simulación requiere de fases o etapas organizadas con el fin de facilitar el proceso de desarrollo, por ello se recurre a un modelo o metodología de desarrollo. El proceso de diseño y desarrollo de la simulación del presente trabajo de grado se basa en el modelo lineal secuencial, conocido también como modelo en cascada, el cual permite una evolución constante a través del seguimiento de fases ordenadas que buscan dar solución a un problema planteado. La figura 4.1 muestra este modelo.

De manera general, el desarrollo de cada una de las etapas se produce de la siguiente manera:

- **Análisis de requisitos:** Permite comprender y limitar el dominio del problema abordado.

- **Diseño:** Permite diseñar la arquitectura del sistema a simular y los procedimientos a implementar. Definición de la herramienta software a utilizar.
- **Implementación:** Consideraciones de la simulación e implementación de los procedimientos definidos mediante la generación de código.
- **Pruebas:** En esta fase se diseñan y ejecutan las pruebas para posteriormente analizar los resultados de la simulación.

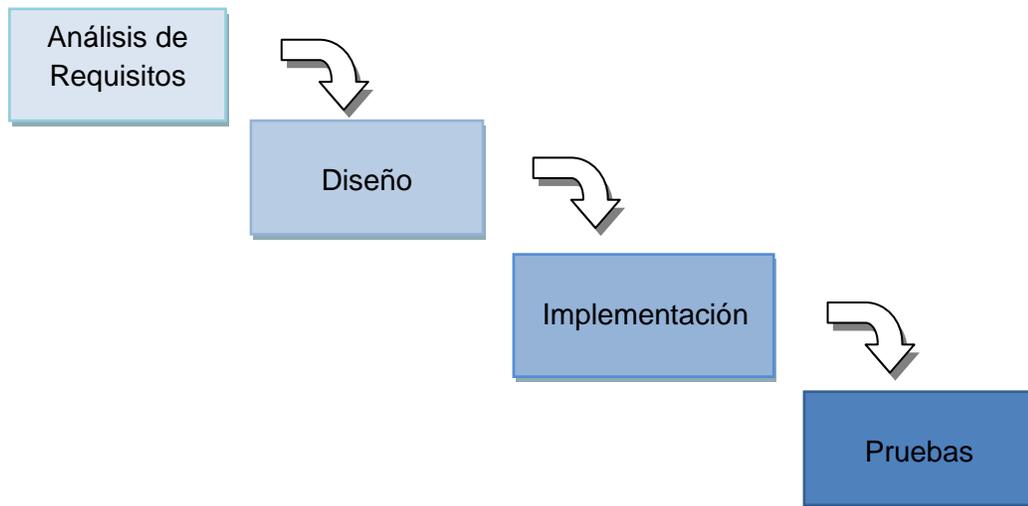


Figura 4.1. Modelo lineal secuencial o de cascada.

4.2.1 Análisis de Requisitos

En esta etapa se evalúan los requerimientos del escenario de simulación a desarrollar, con el fin de comprender y limitar el problema abordado.

Lista de características

Requisitos Funcionales

Requisito 1 → Seleccionar la herramienta de simulación, la cual debe estar basada en un lenguaje de programación de alto nivel para cálculo científico.

Requisito 2 → Especificar un escenario donde interactúen dos estaciones base: una microcelda y una femtocelda. Con la ayuda de la herramienta de simulación, se visualizará la interacción en dicho escenario.

Requisito 3 → Determinar los efectos de la interferencia en términos de capacidad y cobertura en el escenario con n número de usuarios.

Requisito 4 → Aplicar gestión de interferencia en el escenario modelado, mediante control ideal de potencia en el enlace de subida.



Requisito 5 → Realizar análisis estadísticos, mostrando los resultados o efectos del control ideal de potencia sobre la capacidad y cobertura.

Requisitos No Funcionales

La simulación debe ser:

- Multiplataforma.
- De código sencillo y eficiente.

4.2.2 Diseño

Una simulación busca la representación de un fenómeno natural, considerando las características y parámetros más importantes del fenómeno a estudiar, con el fin de tener el mejor acercamiento al sistema real. La etapa de diseño se busca plantear, mediante diagramas de flujo, la solución al problema planteado, con el fin de alcanzar los objetivos propuestos en el presente trabajo de grado.

4.2.2.1 Diagrama del Proceso de Simulación

La aplicación ejecuta una simulación del fenómeno a estudiar un número considerable de veces, con el fin de obtener resultados estadísticamente válidos. En el escenario de simulación se ubican usuarios de manera aleatoria (distribución uniforme), los cuales representan llamadas activas o conexiones en curso en el sistema y de acuerdo a su ubicación se determina por medio de un control ideal de potencia, la potencia con la cual deben transmitir los dispositivos móviles, y se analiza la efectividad del control ante fenómenos como el efecto cerca-lejos y/o interferencias de acceso múltiple (MAI), los cuales afectan la capacidad y cobertura del sistema, cuando no se aplica control de potencia. De este modo se evalúa si el sistema con control de potencia se encuentra en situación de degradación²³, parámetro fundamental de evaluación de desempeño del escenario simulado.

La simulación se realiza según el diagrama de flujo presentado en la figura 4.2, teniendo en cuenta los siguientes pasos:

1. Ubicar los Nodos B (microcelda y femtocelda) en el escenario de simulación.
2. Distribuir un número n de usuarios de forma aleatoria en el escenario de simulación.
3. Definir las características de los UE y Nodos B (potencias máximas de transmisión, ganancias de antenas y pérdidas).
4. Calcular el valor de SIR a partir del parámetro de calidad objetivo (E_b/N_0) definido para las distintas velocidades de transmisión de datos de referencia (12,2, 64,144 y 384 Kbps).

²³ Se dice que un sistema se encuentra en situación de degradación si no existe configuración que permita a todos los usuarios establecer y mantener sus comunicaciones con la calidad requerida, teniendo en cuenta las limitaciones de potencia de los equipos. El concepto de degradación es estático, es decir, se aplica al sistema en un instante determinado [2].



5. Calcular las pérdidas de propagación entre cada usuario (UE) y cada Nodo B, haciendo uso del modelo de propagación propio del ambiente mixto peatonal (*Outdoor to Indoor and Pedestrian Environment*).
6. Asignar los usuarios a los Nodos B, dependiendo del nivel de potencia de señal recibida del canal piloto CPICH, en el enlace de bajada.

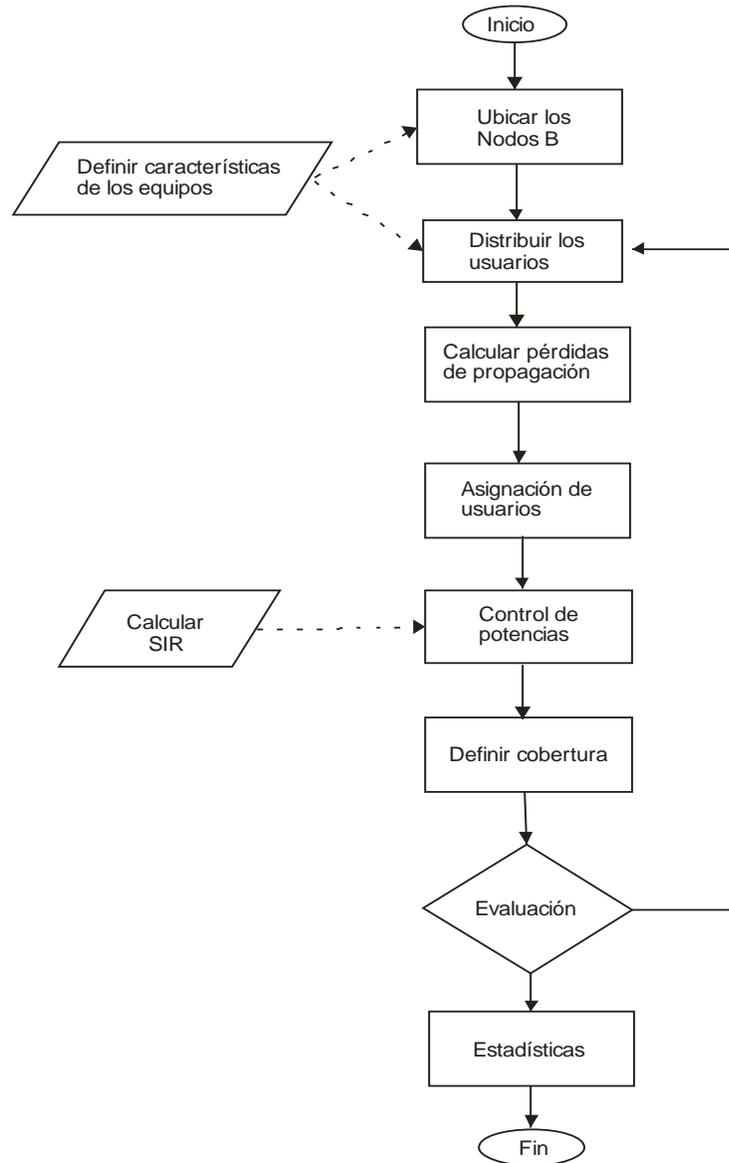


Figura 4.2. Diagrama de flujo del proceso de simulación.

7. Realizar control de potencia ideal, en el enlace de subida (UL), determinando las potencias de transmisión de los UE.
8. Definir el radio de cobertura en el escenario de simulación, con el fin de establecer a cuales usuarios no se les brinda el servicio por requerir un nivel de potencia mayor al máximo del UE.



9. Evaluar los resultados obtenidos con el fin de verificar que las potencias de transmisión de los UEs no representen potencias negativas en unidades naturales (limitación intrínseca), lo cual sería incongruente con el concepto físico de potencia en un escenario real (La potencia en unidades naturales es una cantidad positiva).
10. Realizar gráficas estadísticas de las variables analizadas. Estas son: factor de carga, probabilidad de degradación, potencias de transmisión y cobertura del sistema.
11. Los pasos 1, 4, 5, 7, 8 y 9 se repiten un número de veces considerable para obtener en el paso 10 un resultado estadísticamente válido, y así realizar un análisis de carga, capacidad y cobertura del sistema.

4.2.2.2 Selección de la Herramienta de Simulación

Para cumplir los requerimientos y representar de manera adecuada el sistema bajo análisis del presente trabajo de grado, se realizó la búsqueda de una herramienta de simulación que fuera la más adecuada al momento de representar el escenario de simulación, evaluando aspectos como la usabilidad, seguridad, eficiencia cuando se realizan cálculos matemáticos, el tipo de licencia, los sistemas operativos que la soportan, su documentación y soporte a nivel mundial.

Las herramientas de simulación basadas en lenguajes de alto nivel más representativas, que permiten la implementación de cualquier modelo de simulación son:

- MatLab.
- SciLab.
- GNU Octave.

El principal objetivo del presente trabajo de grado consiste en analizar la interferencia en una femtocelda y cómo ésta varía cuando la femtocelda se encuentra dentro del área de cobertura de una microcelda, y la manera en que ésta afecta la capacidad y cobertura del sistema. Este análisis se realizará con y sin control de potencia por medio de una simulación a nivel de sistema²⁴ de tipo estático (no se considera evolución temporal), donde se incluirán los conceptos y aspectos físico-matemáticos más importantes que definen el comportamiento de sistemas basados en técnicas de acceso CDMA. Para ello se buscó una herramienta de simulación que permitiera construir un escenario con características particulares. Por la sencillez, por su uso libre, por soportar un número considerable de funciones matemáticas y gráficas, por ser multiplataforma, por ser una

²⁴ Una simulación puede presentarse, de manera general, dividida en dos clases: a nivel de enlace (*Link Level*) y a nivel de sistema (*System Level*). Las simulaciones a nivel de enlace analizan la conexión entre un terminal móvil y la estación base o viceversa, y pueden analizar efectos como: dispersión en frecuencia y tiempo del canal, modulación, codificación, operación de elementos como receptores tipo Rake, receptores multiusuario, entre otros; mientras que las simulaciones a nivel de sistema permiten analizar parámetros, modelos, algoritmos y fenómenos relacionados con pérdidas de trayecto, desvanecimiento lento, traspaso suave o continuo, asignación celular, potencia, control de potencia, carga, control de carga, degradación, congestión, control de congestión, generación de tráfico, tipos de receptor, entre otros.



herramienta liviana en cuanto a los requerimientos mínimos exigidos de máquina, se seleccionó Scilab.

De forma práctica y sencilla, Scilab es la herramienta que más se adecua a los requerimientos del presente trabajo de grado, con la ventaja adicional de ser un software libre y multiplataforma.

- **Scilab**

Scilab es un lenguaje de programación de alto nivel, desarrollado por el Instituto Francés de Investigación en Informática y Automática (INRIA, *Institut National de Recherche en Informatique et Automatique*) para aplicaciones en sistemas de control y procesamiento de señales. Scilab brinda funciones para el análisis de sistemas lineales, no lineales, y sistemas matriciales complejos, para lo cual soporta funciones básicas como concatenación, separación o transposición de matrices, además de operaciones básicas como suma y multiplicación [56].

La filosofía general de Scilab es proveer el siguiente tipo de ambiente computacional:

- Tipos de datos variables y flexibles con una sintaxis natural y fácil de usar.
- Conjunto razonable de funciones básicas para una extensa variedad de cálculos.
- Ambiente abierto de programación en donde nuevas funciones puedan ser incluidas.

Las principales características de Scilab son:

- Software para cálculo científico.
- Interactivo.
- Programable.
- Software de uso libre²⁵.
- Disponible para diferentes plataformas.

4.2.3 Implementación

La simulación permitirá evaluar y analizar el desempeño en términos de capacidad y cobertura del sistema planteado, teniendo en cuenta las limitaciones de los sistemas CDMA por interferencia. Esta característica de limitación hace que, determinar el nivel adecuado de potencia de transmisión sea fundamental.

El presente trabajo de grado busca controlar dichas limitaciones por medio de un control ideal de potencia en el enlace de subida, estableciendo los valores óptimos de potencia

²⁵ Un software de uso libre hace referencia a la libertad que tienen los usuarios sobre un producto de adquirirlo, usarlo, modificarlo y redistribuirlo libremente. Este tipo de software suele estar disponible gratuitamente, pero requiere de una Licencia Pública General GNU (GNU GPL, *General Public License*), creada con el fin de proteger la libre distribución, modificación y uso de software, protegiéndolo de intentos de apropiación que restrinjan las libertades de los usuarios [57].



en transmisión de los UEs que tienen una llamada activa en un instante determinado, para atender al mayor número de usuarios mientras se cumple con los requerimientos de calidad de cada servicio, y de igual manera determinar el número de usuarios que no podrán ser atendidos (condición de degradación).

El análisis de capacidad y cobertura que se realiza en este trabajo de grado se basa en ecuaciones generales abstraídas del funcionamiento general del sistema, las cuales permiten un análisis sencillo acerca de las limitaciones de un sistema WCDMA y las posibles ventajas del uso de las femtoceldas.

La simulación a nivel de sistema servirá como herramienta de soporte para los procesos de enseñanza y aprendizaje en el área de los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos, específicamente en el de sistemas de tercera generación basados en WCDMA (UMTS).

Cabe resaltar que existen otros procedimientos que al igual que el control de potencia permiten maximizar u optimizar el desempeño del sistema en términos de capacidad y cobertura, como lo son el control de admisión y el control de congestión, pero el estudio desarrollado en el presente trabajo de grado solo se basa en los aspectos de control de potencia y asignación celular.

4.2.3.1 Consideraciones de la Simulación

Para la construcción del código de simulación se tuvieron en cuenta varios parámetros importantes del sistema, correspondientes al estándar WCDMA (UMTS). Los parámetros de equipos (potencias de transmisión, ganancias de antena) se toman del mismo estándar, de acuerdo a las especificaciones técnicas y los reportes técnicos del 3GPP, así como las recomendaciones del UMTS Forum y el ETSI.

4.2.3.1.1 Parámetros del sistema

Se considera un sistema con dos estaciones base o nodos B que cumplen las especificaciones del estándar WCDMA en modo FDD. El análisis se realiza en un escenario urbano microcelular, en el cual no se tienen en cuenta edificios, estructuras, ni se utiliza una cuadrícula tipo Manhattan, haciendo uso del modelo de propagación para un ambiente mixto peatonal (*Outdoor to Indoor and Pedestrian*), válido para comunicaciones que no tienen línea de vista (NLOS). El modelo asume un desvanecimiento por sombra (distribución log-normal) con una desviación estándar de 10 dB para exteriores y de 12 dB para interiores. Cabe resaltar que dada la inclusión de este parámetro en el modelo de propagación, durante la simulación no se incluirá ningún proceso que modele el desvanecimiento por sombra.

La calidad de la señal deseada depende de las potencias de transmisión de cada uno de los usuarios y el número de usuarios con llamadas activas y sirve como base para el análisis del control de potencia. Por lo tanto para este trabajo de grado se toman valores



de la relación E_b/N_0 requerido para cada servicio²⁶ (voz y datos) acorde a las especificaciones del 3GPP para cada una de las velocidades de transmisión de datos de referencia, considerando un canal AWGN²⁷ o estático sin diversidad en recepción.

El canal AWGN supone condiciones de propagación estáticas, donde no se tiene en cuenta el efecto de desvanecimiento rápido generado por la multitrayectoria; debido a ello, dicha atenuación o desvanecimiento se ha considerado en la simulación como un parámetro aleatorio generado mediante la distribución Rayleigh a partir de la pérdida básica brindada por el modelo de propagación seleccionado, dado que este tipo de pérdidas afectan la comunicación cuando el UE se desplaza a bajas velocidades, considerados en este caso, como transeúntes a una velocidad de 3 Km/h.

Dentro del sistema no se considera diversidad de frecuencia²⁸ ni diversidad de tiempo²⁹, y no se considera diversidad de antena (múltiples antenas) tanto en transmisión como en recepción, tampoco se consideran receptores multiusuario (MUD) ni ganancias por SHO, ya que en la simulación no se consideran usuarios en condición de traspaso suave o continuo, asumiendo que cada usuario se encuentra conectado a un único nodo B.

La simulación lleva a cabo la representación del sistema en un instante de tiempo específico (simulación estática, no hay evolución temporal), considerando que todos los usuarios tienen llamadas activas en ese momento y determinando la interferencia que causan, para así realizar un control de potencia que permita mejorar el funcionamiento del sistema en términos de capacidad y cobertura. Para ello, se realizan simulaciones para cada una de las velocidades de transmisión de datos de referencia de los usuarios. Cada simulación se realiza un número considerable de veces con el fin de obtener unos resultados estadísticamente válidos; a partir de los resultados de cada una de las simulaciones. A partir del análisis de los resultados globales se extraen conclusiones acerca de diversos aspectos de funcionamiento del sistema. La tabla 4.1 [26] muestra las

²⁶ Generalmente estos valores de calidad son el resultado de simulaciones a nivel de enlace los cuales permiten obtener una determinada BER y BLER para unas condiciones específicas de canal.

²⁷ El canal de Ruido Gaussiano Blanco Aditivo (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*) considera una señal de ruido presente en todas las frecuencias del espectro, con una función de distribución de probabilidad gaussiana. Se considera aditivo porque es una señal no deseada que se suma o se adhiere a la señal de información [16].

²⁸ Cuando se usa diversidad de frecuencia la información se transmite en más de una portadora, de tal forma que las señales no experimenten el mismo desvanecimiento. Se debe considerar una separación en frecuencia necesaria para que los canales no estén parcial o totalmente correlacionados [15].

²⁹ En la diversidad de tiempo la información se transmite repetidamente en tiempos diferentes, de forma que la repetición se haga en condiciones independientes de desvanecimiento. Esto se consigue mediante técnicas de detección y corrección de errores y el uso del entrelazado, técnicas que dependen de la tecnología aplicada [15].



diferentes velocidades de transmisión, además de los valores de parámetros correspondientes a cada velocidad de transmisión de datos de referencia.

Tabla 4.1. Parámetros indicados para cada velocidad de transmisión.

Parámetro	Velocidad de transmisión de datos de referencia			
	12.2 Kbps	64 Kbps	144 Kbps	384 Kbps
Eb/No	8.3 dB	4.8 dB	4 dB	4.1 dB
Ganancia de Procesamiento (PG)	24.98 dB	17.18 dB	14.26 dB	10 dB
$SIR^{30} = Eb/No - PG$	-16.68 dB	-12.38 dB	-10.26 dB	-5.9 dB

Los valores de Eb/No requerido son considerados a partir de la especificación técnica [19], en la cual se definen valores para un canal AWGN de un sistema sin diversidad, y para una Tasa de Error de Bloque (BLER, *Block Error Rate*) requerido menor a 10^{-2} para cada una de las velocidades de transmisión de datos de referencia, identificadas en la tabla 4.1.

En cuanto a los valores establecidos para la SIR en la tercera fila de la tabla 4.1, se calculan a partir de los valores de Eb/No requerido presentados en la misma tabla, y la ganancia de procesamiento, la cual se encuentra en función de la velocidad de transmisión de datos de referencia y de la tasa de chip empleada en el sistema. Para WCDMA la tasa de chip es de 3.84 Mcps.

De igual manera, la simulación del sistema define parámetros generales que se resumen en la tabla 4.2. Cabe resaltar que las frecuencias seleccionadas hacen parte de la banda de operación I, definidas por el 3GPP en [19].

Tabla 4.2. Parámetros generales del sistema.

Parámetro	Sistema
Frecuencia	Enlace de Subida: 1920 MHz Enlace de Bajada: 2110 MHz
Modelo de propagación	Ambiente mixto peatonal
Ambiente	Microcelular urbano
No se consideran traspasos	No hay ganancia de SHO

³⁰ El valor de SIR representa de cierta manera la relación portadora a interferencia, debido a esto se muestra que el nivel de potencia de la señal deseada se encuentra por debajo del nivel de interferencia total.



Velocidad del móvil	3 Km/h
Figura de ruido (NF)	5 dB

Dentro del escenario de simulación se disponen de dos tipos de nodos B, un nodo B para microcelda y un nodo B para femtocelda, cada uno con parámetros específicos, los cuales se resumen en la tabla 4.3. Cabe destacar que el valor seleccionado de potencia del canal CPICH correspondiente al 10% de la potencia máxima de transmisión es el recomendado en [10]. Los parámetros principales considerados en los equipos terminales de usuario (UE) se resumen en la tabla 4.4.

Tabla 4.3. Parámetros estaciones base (Nodos B).

Parámetro	Microcelda	Femtocelda
Radio de cobertura	400 m	150 m
Potencia Máxima en transmisión (Ptx)	35 dBm	20 dBm
Potencia del CPICH (10% del Ptx)	25 dBm	10 dBm
Ganancias de antenas	3 dBi	3 dBi
Pérdidas por conexión	0 dB	0 dB

Tabla 4.4. Parámetros estaciones móviles (UE).

Parámetro	Equipo de Usuario
Potencia máxima de transmisión	21 dBm para Voz (terminal tipo 4). 24 dBm para Datos (terminal tipo 3).
Potencia mínima de transmisión	-50 dBm
Ganancia de antenas	0 dBi
Pérdidas de cuerpo ³¹	3 dB para Voz No Aplica para Datos

³¹ Las pérdidas de cuerpo están relacionadas con la proximidad (o el contacto directo) entre el equipo terminal (UE) y el cuerpo del usuario. Estas pérdidas son consideradas tanto en transmisión como en recepción.



4.2.3.1.2 Consideraciones matemáticas

En la simulación se tuvieron en cuenta ciertas consideraciones matemáticas las cuales permitieron implementar un algoritmo de control de potencia ideal, que permitió analizar la mejora en el desempeño del sistema presentado, en términos de capacidad y cobertura. Dichas consideraciones se reducen a dos conceptos principales: control de potencia y carga en las celdas.

→ **Control de potencia**

El algoritmo de control de potencia ideal aquí aplicado presenta una solución que mitiga las interferencias presentes en un sistema WCDMA, tales como el problema cerca-lejos y la interferencia de acceso múltiple, las cuales limitan el sistema en capacidad y cobertura. El algoritmo busca controlar los niveles de potencias que los UEs emplean en transmisión, de manera que todos los usuarios sean “escuchados” por el nodo B con el mismo nivel de potencia, independiente de la distancia a la que se encuentren de éste.

El valor de la SIR objetivo del sistema depende de la velocidad de transmisión de datos, la tasa de chip empleada y el valor de E_b/N_o requerido en cada caso, obedeciendo la ecuación (4.1).

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{Req} = (SIR)_{Obj} + PG \quad (4.1)$$

Donde:

$PG \rightarrow$ Ganancia de Procesamiento (*Processing Gain*). Valor en dB.

Luego,

$$SIR_{Obj} = \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{Req} - PG \quad (4.2)$$

Donde la ganancia de procesamiento está representada por la ecuación (4.3).

$$PG[dB] = 10 \log\left(\frac{\text{Tasa de Chip}}{\text{Tasa de Bit}}\right) \quad (4.3)$$

De esta manera se establece un valor de SIR objetivo, parámetro que mediante el control de potencia se busca alcanzar. A partir de este valor se realiza una serie de cálculos que finalmente permiten obtener los niveles de potencia adecuados para usar en transmisión.

Durante la simulación, los equipos terminales de usuario se asignan a una de las estaciones base o nodos B (femtocelda o microcelda) dependiendo del nivel de potencia recibido del canal CPICH por los UE provenientes de los nodos B. Una vez seleccionado el nodo B, se procede a calcular las potencias con la que todos los UEs, con llamadas activas en ese instante específico, deben transmitir a partir del valor de la SIR objetivo especificada para su comunicación.



La ecuación (4.4) muestra la relación entre el SIR objetivo, las potencias de recepción y el ruido percibidos por el nodo B.

$$sir_{BS_M, USUARIO_K} = \frac{p_{Rx}(BS_M, USUARIO_K)}{\sum_{J=1}^n p_{Rx}(BS_M, USUARIO_J) + p_N} \quad (4.4)$$

Donde,

- $sir_{BS_M, USUARIO_K}$ → Valor de SIR objetivo para un $USUARIO_K$ que se conecta a una BS_M .
- $p_{Rx}(BS_M, USUARIO)$ → Potencia recibida de un $USUARIO_J$ en una BS_M .
- p_N → Potencia de ruido en una BS_M .

La potencia recibida de cada usuario con llamada activa en el nodo B, se determina a partir de la potencia de transmisión, las ganancias de antenas y las pérdidas de propagación, tal como se muestra en la ecuación (4.5) para cantidades en unidades naturales.

$$p_{Rx}(BS_M, USUARIO_K) = p_{Tx USUARIO_K} \frac{g_{Tx} g_{Rx}}{l} \quad (4.5)$$

Donde,

- $p_{Tx USUARIO_K}$ → Potencia de transmisión de un $USUARIO_K$ que se conecta a una BS_M .
- g_{Tx} → Ganancia de antena en transmisión.
- g_{Rx} → Ganancia de antena en recepción.
- l → Pérdidas.

De igual manera l representa las pérdidas del enlace, tal como se muestra en la ecuación (4.6), para cantidades en unidades naturales.

$$l = l_p l_B \quad (4.6)$$

Donde,

- l_p → Pérdidas de propagación para un usuario que se conecta a un nodo B, obtenidas a partir del modelo de propagación seleccionado.
- l_B → Pérdidas de cuerpo, consideradas solo para comunicaciones de voz (12.2 Kbps).

Dicho de otra manera, la potencia en recepción puede ser representada, tal como aparece en la ecuación (4.7) donde las variables se encuentran en unidades naturales.

$$p_{Rx}(BS_M, USUARIO_K) = p_{Tx USUARIO_K} (\gamma_{USUARIO_K}) \quad (4.7)$$

Donde $\gamma_{USUARIO_K}$ relaciona ganancias y pérdidas del enlace, tal como aparece en la ecuación (4.8).

$$\gamma_{USUARIO} = \frac{g_{Tx} g_{Rx}}{l} \quad (4.8)$$



Ahora, reemplazando la ecuación (4.7) en la ecuación (4.4), se logra obtener la ecuación (4.9), la cual relaciona el valor de SIR objetivo, la potencia de ruido, ganancias de antenas, pérdidas de propagación y potencias de transmisión, todas en unidades naturales, teniendo como única variable desconocida $p_{Tx\ USUARIO_K}$ resuelta a partir de ecuaciones matriciales.

$$SIR_{BS_M, USUARIO_K} = \frac{p_{Tx\ USUARIO_K} (\gamma_{USUARIO_K})}{\left(\sum_{J=1}^n p_{Tx\ USUARIO_J} (\gamma_{USUARIO_J}) \right) + p_N} \quad (4.9)$$

El sistema de ecuaciones lineales representado en la ecuación (4.9) se puede escribir en forma matricial, tal como se observa en la ecuación (4.10) en donde N representa el vector p_N :

$$N = AP \quad (4.10)$$

Donde A representa la matriz de atenuación la cual depende del número de usuarios (K) y del número de estaciones base (M), en donde se relacionan las pérdidas de trayecto de los usuarios, las ganancias de antenas y las pérdidas de cuerpo de los terminales, de acuerdo a la SIR objetivo del sistema. Mientras que P representa el vector potencias de transmisión de los usuarios. La ecuación (4.10) representa un sistema lineal de ecuaciones que permite determinar la potencia con la que cada UE debe transmitir.

Suponiendo que la matriz A es no singular ($\det(A) \neq 0$) con $B = A^{-1}$, el vector potencias de transmisión se obtiene como se muestra en la ecuación (4.11).

$$P = BN \quad (4.11)$$

De la ecuación (4.11) se calcula el vector de potencias P , compuesto por los valores asignados para cada uno de los equipos de usuario (UE) en el sistema, de manera que todos los usuarios sean escuchados por el nodo B con el mismo nivel de potencia, al tiempo que se cumple con el valor de SIR objetivo establecido para la comunicación.

Cabe resaltar que dentro de la simulación aquí presentada, las atenuaciones dependen de la ubicación aleatoria de los usuarios. Con un valor de SIR objetivo estático y para un cierto número de usuarios, los valores del vector P se pueden encontrar en 3 situaciones distintas.

1. Potencias de transmisión positivas sin exceder el límite del terminal. Existe una solución admisible única, compatible con las limitaciones de potencia en los terminales. Es posible, por tanto, alcanzar la calidad objetivo para todos los usuarios.
2. Potencias de transmisión positivas excediendo el límite del terminal. Existe una solución admisible única, pero no es compatible con las limitaciones de máxima potencia de transmisión. En este caso el sistema tiene una limitación por potencia: no es posible alcanzar las calidades objetivo para todos los usuarios debido a las restricciones de potencia en transmisión.



3. Potencias de transmisión negativas. No existe solución admisible. El sistema tiene una limitación intrínseca, ya que no es posible alcanzar las calidades objetivo con ningún conjunto de valores positivos (unidades lineales) para las potencias de transmisión.

En las situaciones 2 y 3 el sistema se encuentra en degradación. En la situación 2, las potencias que exceden el límite se ven como usuarios a los cuales no es posible brindarles servicio y no se tienen en cuenta para calcular la carga del sistema. La situación 3 se evita limitando el número de usuarios por simulación, garantizando que esta situación no se presente.

→ **Carga en las celdas**

La carga es el parámetro de medición de la cantidad de interferencia presente en una celda, mostrando la relación existente entre las potencias recibidas y la interferencia total del sistema. La carga es obtenida al resolver la ecuación (4.12).

$$\eta_{UL} = \sum_{j=1}^n l_j \quad (4.12)$$

Donde la carga de una sola conexión (L_j) está representada por la ecuación (4.13).

$$l_j = \frac{p_{Rx(BS_M, USUARIO_j)}}{i_{TOTAL}} \quad (4.13)$$

Donde $p_{Rx(BS_M, USUARIO_j)}$ es la potencia recibida del $USUARIO_j$ en una BS_M , e i_{TOTAL} es la suma de todas las potencias recibidas incluyendo la potencia del usuario j .

Remplazando (4.13) en (4.12) se obtiene la ecuación (4.14).

$$\eta_{UL} = \frac{\sum_{j=1}^n p_j}{i_{TOTAL}} \quad (4.14)$$

Donde la i_{TOTAL} del sistema está representada por la ecuación (4.15).

$$i_{TOTAL} = \left(\sum_{j=1}^n p_j \right) + p_N \quad (4.15)$$

Remplazando (4.15) en (4.14) se obtiene la ecuación (4.16).

$$\eta_{UL} = \frac{\sum_{j=1}^n p_j}{\left(\sum_{j=1}^n p_j \right) + p_N} \quad (4.16)$$

4.2.3.1.3 Escenario de simulación

La simulación lleva a cabo la representación de un escenario cuadrangular dentro del cual se distribuye de manera aleatoria (distribución uniforme) un número específico de usuarios, cuyas características son las representadas en la tabla 4.4. El número de usuarios se determina de acuerdo a la cantidad máxima que el sistema puede soportar para un servicio en particular.

Dentro del escenario definido se incluye una microcelda en el centro del escenario, la cual se representa con un punto de color rojo, mientras que la femtocelda se ubica a un costado de la microcelda y se representa con un punto de color azul, como se observa en la figura 4.3. Los equipos terminales de usuario se identifican por triángulos cuya coloración varía de acuerdo a las siguientes condiciones:

- Amarillo: El usuario se encuentra conectado a la microcelda.
- Verde: El usuario se encuentra conectado a la femtocelda.
- Negro: El usuario se encuentra desconectado (sin servicio).

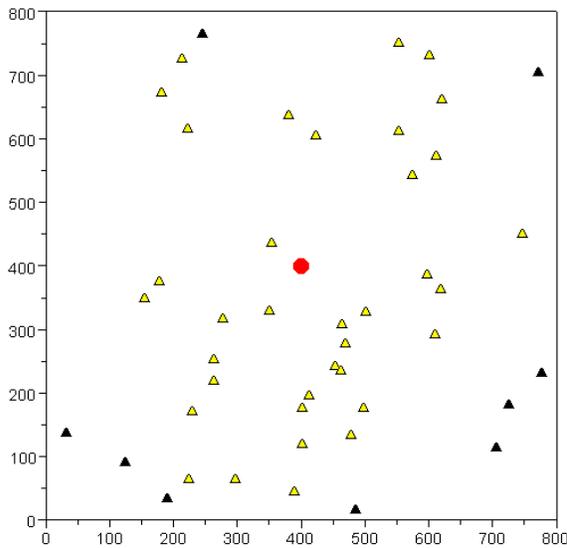


Figura 4.3(a). Escenario de simulación de una microcelda.

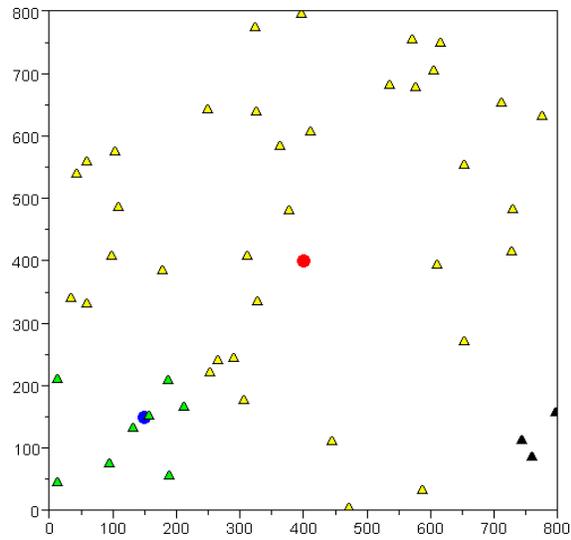


Figura 4.3(b). Escenario de simulación de la Interacción microcelda-femtocelda.

La definición del estado de un UE (conectado, no conectado) depende del cumplimiento de los parámetros establecidos en la tabla 4.4 en términos de potencia, es decir, cuando un UE determina que para ser escuchado por el nodo B requiere transmitir con altos niveles de potencia superiores a los niveles máximos establecidos, a dicho usuario en particular no se le prestará el servicio (estado desconectado).

De igual manera, para determinar si un usuario se conecta a la microcelda o a la femtocelda, se analizan los niveles de potencia recibidos de los canales piloto (CPICH) proveniente de cada nodo B; esto se traduce en establecer cuál nodo B le puede brindar



una mejor comunicación al móvil, por lo que éste seleccionará aquel nodo B cuyo canal piloto escuche con más fuerza de acuerdo al nivel de potencia recibido.

4.2.4 Pruebas

En esta fase se diseñó y se ejecutó un plan de pruebas de la simulación básica estática a nivel de sistema, que permitió realizar una evaluación y un análisis de capacidad y cobertura del sistema, teniendo en cuenta la interferencia causada por los usuarios y el control de potencia ideal como método de gestión de interferencia. Se presenta un plan de pruebas que selecciona las simulaciones cuyos resultados fueron los más significativos, con el fin de facilitar el análisis acerca de la favorabilidad de aplicar un algoritmo de control de potencia y las posibles ventajas de la introducción de una femtocelda dentro del área de cobertura de una microcelda.

4.2.4.1 Plan de Pruebas

El plan de pruebas de la simulación está conformado por una serie de simulaciones siguiendo el método Montecarlo³², el cual propone repetir una simulación un número considerable de veces de tal manera que permita hallar la probabilidad de un suceso. Para el desarrollo de la simulación propuesta en este trabajo de grado se estableció que, realizar 10000 simulaciones básicas estáticas a nivel de sistema, arroja resultados estadísticamente válidos. Dichas simulaciones permiten determinar el valor de potencia de transmisión necesario medio de los UEs, el radio promedio máximo de cobertura, la carga promedio en las celdas y la probabilidad de degradación del sistema, a partir de parámetros de entrada como: posición del UE, E_b/N_0 requerido relacionado a la velocidad de transmisión de datos de referencia y número de usuarios. El número de usuarios se limitó evitando obtener potencias negativas o limitación intrínseca.

En la tabla 4.5 se presentan las simulaciones a nivel de sistema que se realizaron al escenario propuesto, donde se aplica el control ideal de potencia para algunas de las simulaciones, con el fin de analizar el beneficio de aplicar o no dicho control. Del mismo modo, en la tabla 4.5 se plantean diferentes escenarios de simulación que incluyen a la femtocelda, la microcelda, y una combinación de ambas, para una velocidad de transmisión de 12.2 Kbps, soportando un servicio de voz. Se consideran diferentes variables a partir de las cuales se presentan gráficas estadísticas.

Debe considerarse que el plan de pruebas de la tabla 4.5 se realizó para diferentes velocidades de transmisión, como son: 64, 144 y 384 Kbps. Pero por cuestiones de extensión del documento, los resultados obtenidos a partir de estas velocidades, se presentan de manera directa y resumida en las tablas 4.12, 4.14 y 4.16 mostradas más adelante.

³² El método Monte Carlo es una técnica de muestreo artificial que se emplea como herramienta de investigación y planeación, que opera numéricamente sistemas complejos que tengan componentes aleatorios. Es muy utilizado en los lenguajes de programación para hallar la probabilidad de un suceso [2].



Tabla 4.5. Plan de pruebas para una velocidad de transmisión de 12.2 Kbps.

Velocidad de transmisión	Escenarios	Simulaciones	Control de potencia	Gráficas estadísticas	# de usuarios
12.2 Kbps	Escenario 1: Femtocelda	Simulación 1.1	SI	Carga	20
				Potencias de usuarios	
				% degradación	
				Cobertura	
		Simulación 1.2	SI	Carga	47
				Potencias de usuarios	
				% degradación	
				Cobertura	
		Simulación 1.3	NO	Carga	20
	Escenario 2: Microcelda	Simulación 2.1	SI	Carga	20
				Potencias de usuarios	
				% degradación	
				Cobertura	
		Simulación 2.2	SI	Carga	47
	Potencias de usuarios				
	% degradación				
	Simulación 2.3	NO	Carga	20	
	Escenario 3: Microcelda y femtocelda	Simulación 3.1	SI	Carga	20
				Potencias de usuarios (Microcelda)	
				Potencias de usuarios (Femtocelda)	
% degradación					
Cobertura					
Simulación 3.2		NO	Carga	20	
Simulación 3.3		SI	Carga	47	
			Potencias de usuarios (Microcelda)		
			Potencias de usuarios (Femtocelda)		
			% degradación		
Simulación 3.4	SI	Carga	10		
		Potencias de usuarios (Microcelda)			
		Potencias de usuarios (Femtocelda)			
		% degradación			
				Cobertura	



De manera general, las variables que permiten obtener gráficas de resultados y realizar el análisis estadístico son:

- **Carga:** Representa la cantidad de interferencia presente en el sistema en un momento dado. Se mide por el factor de carga y se recomienda un valor del 50%. A partir de un factor de carga del 70% la interferencia se incrementa rápidamente haciendo que el sistema WCDMA sea inestable.
- **Potencia de usuarios:** Indica los niveles de potencia de transmisión que los usuarios requieren para conectarse al nodo B asignado. Valores en unidades logarítmicas dBm.
- **Probabilidad de degradación:** Número de usuarios no atendidos con respecto al total de usuarios en una celda o en un sistema. Es un parámetro a nivel de sistema cuyo porcentaje se ha asignado de manera específica en este trabajo de grado con un valor no mayor al 5%.
- **Cobertura:** Valor en metros que determina cuán distante puede estar un usuario del nodo B.

Cabe resaltar que en las simulaciones en donde no se aplica control de potencia, las gráficas estadísticas de “Probabilidad de degradación”, “Potencia de usuarios” y “Cobertura”, no se presentan dado que sus valores se consideran máximos. Además, las gráficas estadísticas presentan los resultados en diagramas de barras, los cuales muestran valores según el límite superior.

4.2.4.2 Simulaciones

4.2.4.2.1 Escenario 1: Femtocelda

En este escenario se presenta como único nodo B a la femtocelda, ubicada en el centro de un escenario de simulación de 300 x 300 metros, acompañada por un número determinado de usuarios, repartidos aleatoriamente a lo largo del escenario, como se muestra en la figura 4.4.

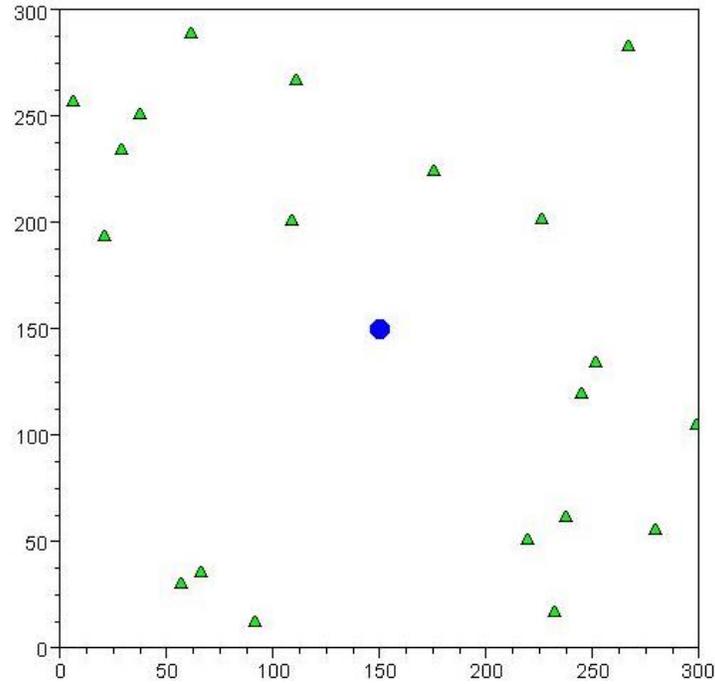


Figura 4.4. Escenario 1 de simulación: femtocelda.

Simulación 1.1

Las figuras 4.5 (a, b, c y d) muestran los resultados estadísticos tras simular 10000 veces la simulación 1.1 sobre la plataforma SciLab, para las condiciones establecidas en la tabla 4.5.

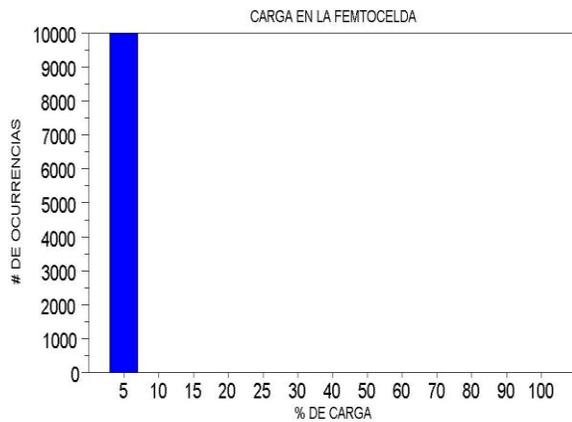


Figura 4.5(a). Factor de carga.

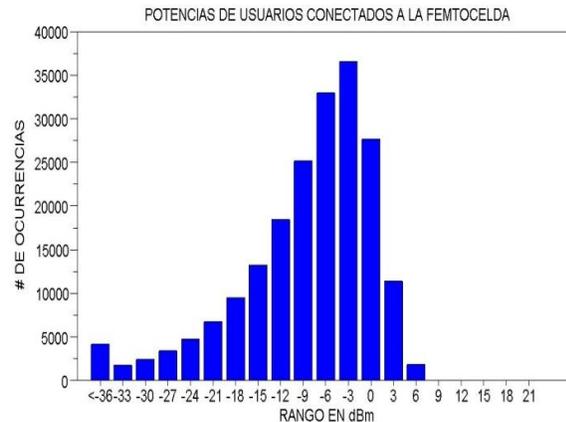


Figura 4.5(b). Potencias de transmisión.

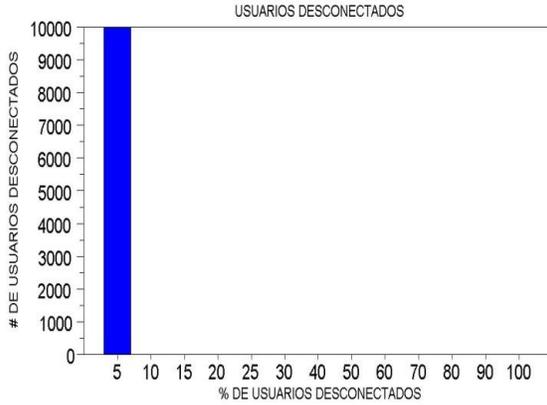


Figura 4.5(c). Probabilidad de degradación.

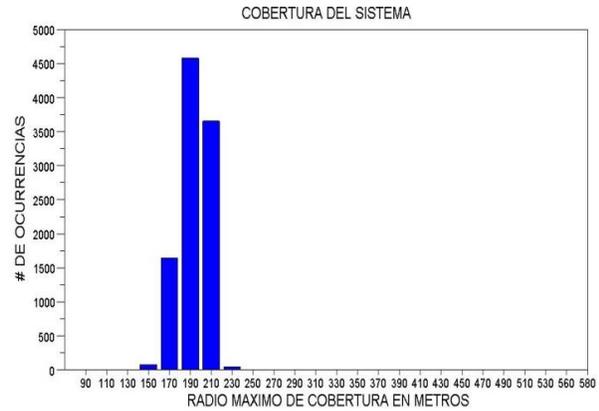


Figura 4.5(d). Cobertura en la femtocelda.

A partir de las figuras 4.5 (a, b, c y d) puede observarse que el número de usuarios desconectados, representados por la probabilidad de degradación del sistema (figura 4.4(c)), no supera el valor establecido del 5%, lo que implica que el sistema no se encuentra en degradación.

Simulación 1.2

Las figuras 4.6 (a, b, c y d) muestran los resultados estadísticos tras simular 10000 veces la simulación 1.2, para las condiciones establecidas en la tabla 4.5.

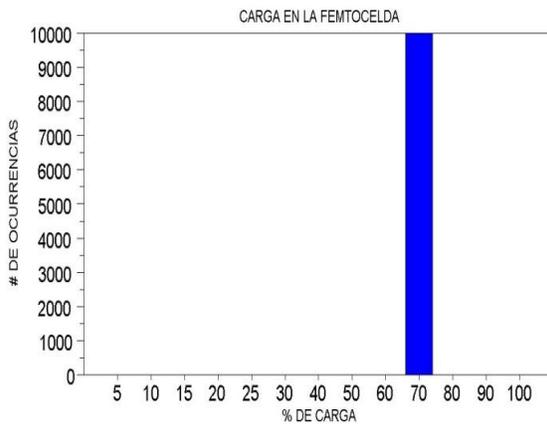


Figura 4.6(a). Factor de carga.

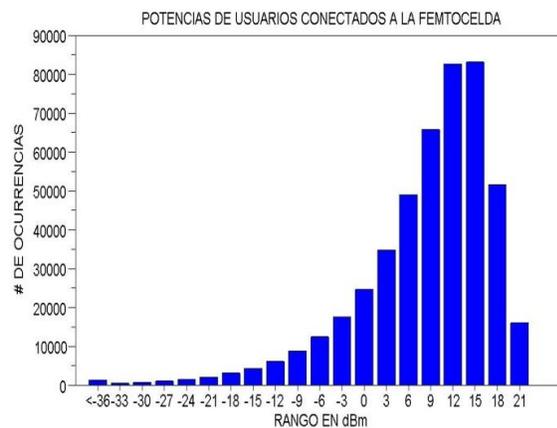


Figura 4.6(b). Potencias de transmisión.

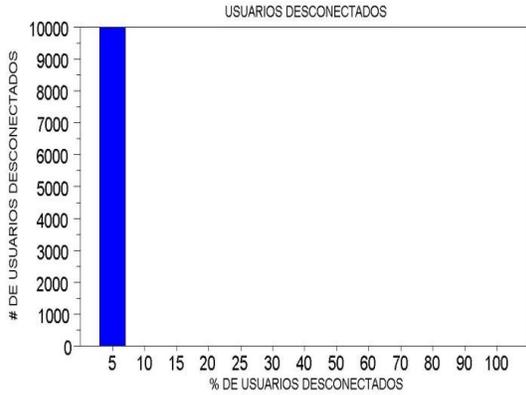


Figura 4.6(c). Probabilidad de degradación.

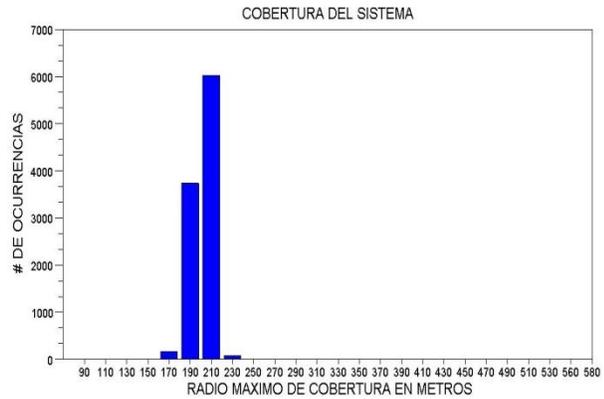


Figura 4.6(d). Cobertura en la femtocelda.

En esta simulación se observa que el incremento en el número de usuarios aumenta la carga del sistema, superando el 50% recomendado, lo que indica un aumento en la interferencia presente en el sistema, haciendo que los niveles de potencia en transmisión requeridas por los UEs sean mayores, pero sin llegar a superar el valor máximo permitido de 21 dBm para una comunicación de voz, por lo cual se mantiene la probabilidad de degradación.

Simulación 1.3

La figura 4.7 muestra los resultados estadísticos tras simular 10000 veces la simulación 1.3, para las condiciones establecidas en la tabla 4.5, en la cual no se realiza control de potencia y por ello todos los usuarios transmiten con el valor máximo de potencia (21 dBm). En la misma figura se observa que la carga del sistema es del 100%, lo que indica que al no aplicar control de potencia, la interferencia que se presenta en este tipo de sistema es demasiado alta.

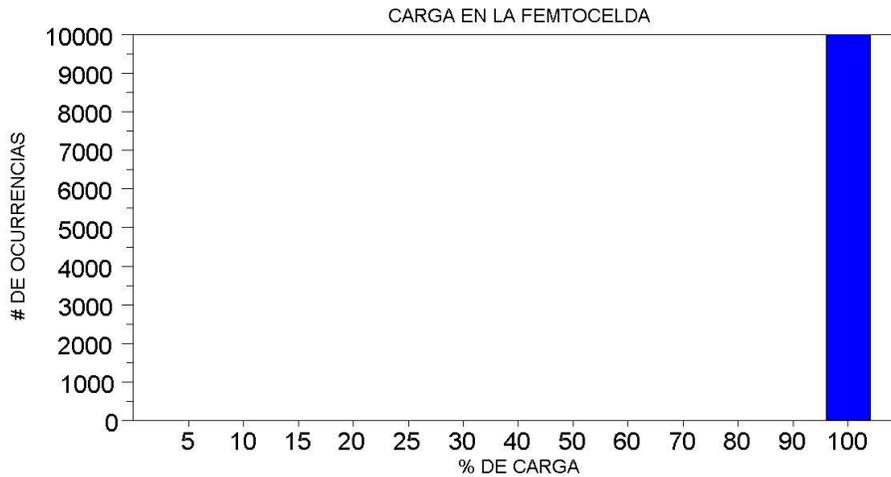


Figura 4.7. Factor de carga.



A continuación se presenta la tabla 4.6 donde se resumen los valores promedio obtenidos de cada una de las variables de las tres simulaciones del escenario 1.

Tabla 4.6. Cuadro comparativo escenario 1.

FEMTOCELDA	¿Se aplica control de potencia?	Número de usuarios	Factor de Carga	Potencias de transmisión	Probabilidad de degradación	Cobertura
Simulación 1.1	SI	20	≤ 5%	-3 dBm	≤ 5%	190 m
Simulación 1.2	SI	47	70%	15 dBm	≤ 5%	210 m
Simulación 1.3	NO	20	100%	N.A.	N.A.	N.A.

En la tabla 4.6 se observa como el aumento en el número de usuarios representa un incremento en la interferencia del sistema, aumentando la carga y elevando los niveles requeridos de potencia de transmisión por parte de los UEs. Por otro lado, se observa claramente que al realizar control de potencia, el desempeño del sistema mejora considerablemente al disminuir el factor de carga del mismo.

Cabe resaltar que la cobertura del sistema debería reducirse como consecuencia del aumento de la carga, sin embargo, de la simulación 1.2 se observa un aumento en el radio de cobertura, esto se debe a un mayor número de usuarios, los cuales pudieron ubicarse a lo largo de todo el escenario, alcanzando mayores distancias sin sobrepasar el valor máximo de potencia de transmisión.

4.2.4.2.2 Escenario 2: Microcelda

En este escenario se presenta como único nodo B a la microcelda, ubicada en el centro de un escenario de simulación de 800 x 800 metros, acompañada por un número determinado de usuarios, repartidos aleatoriamente a lo largo del escenario, como se muestra en la figura 4.8.

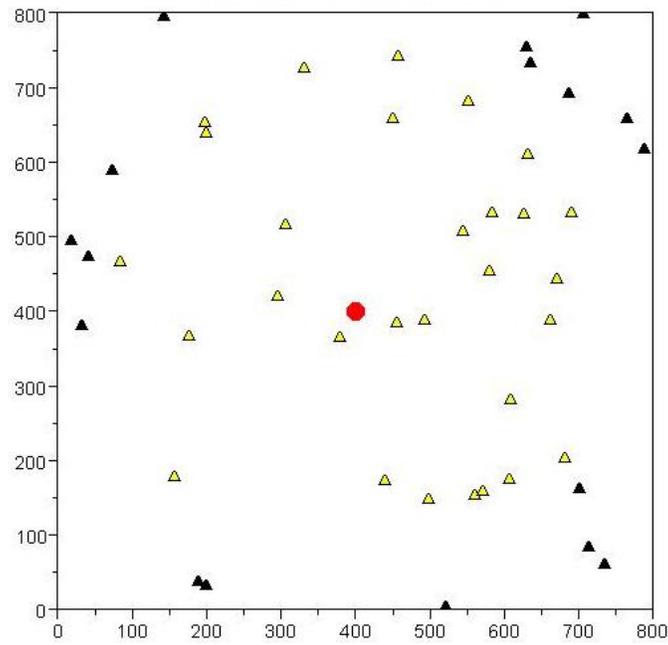


Figura 4.8. Escenario 2 de simulación: microcelda.

Simulación 2.1

Las figuras 4.9 (a, b, c y d) muestran los resultados estadísticos tras simular 10000 veces la simulación 2.1, para las condiciones establecidas en la tabla 4.5.

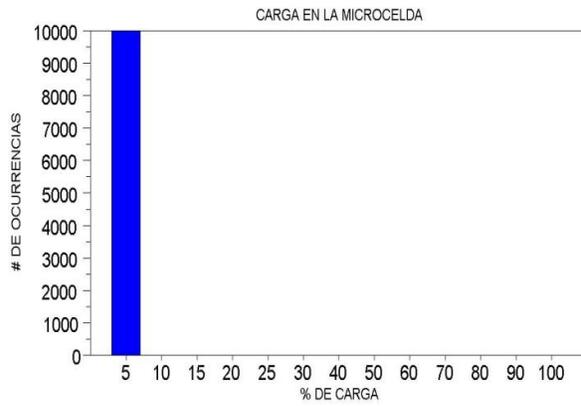


Figura 4.9(a). Factor de carga.

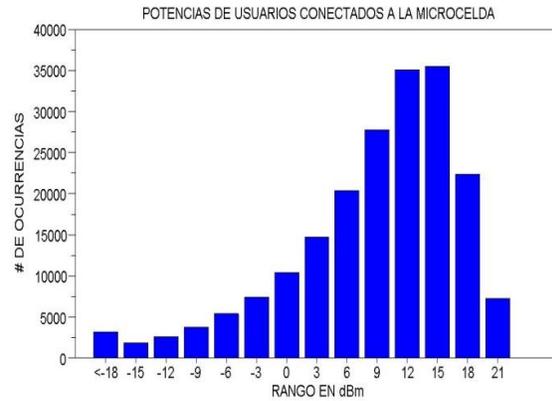


Figura 4.9(b). Potencias de transmisión.

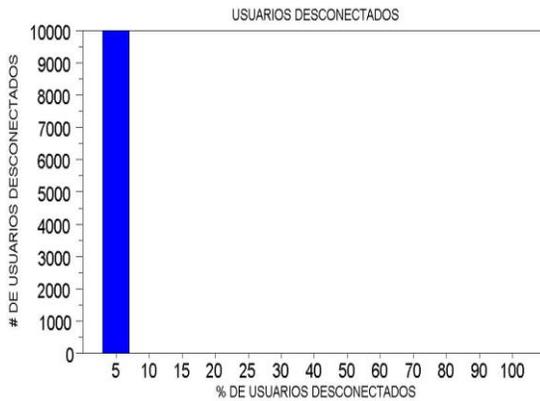


Figura 4.9(c). Probabilidad de degradación.

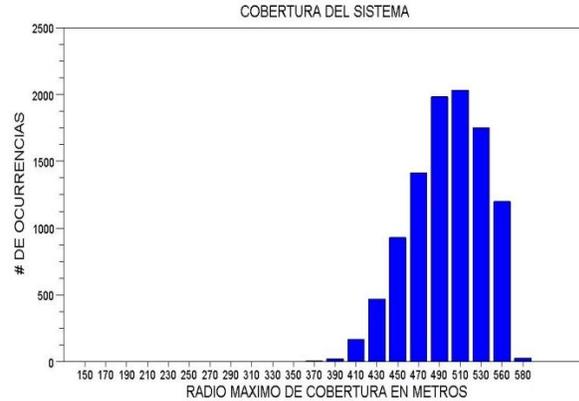


Figura 4.9(d). Cobertura en la microcelda.

A partir de las figuras 4.9 (a, b, c y d) se observa un buen desempeño del sistema ya que las variables resultantes se encuentran dentro de los rangos establecidos para una comunicación de voz. Es decir por ejemplo, el número de usuarios desconectados, representados por la probabilidad de degradación del sistema, no supera el valor establecido del 5%, lo que implica que el sistema no se encuentra en degradación. El factor de carga del sistema no sobrepasa el 50% recomendado e incluso es mucho menor. Las potencias de transmisión empleadas por los usuarios, en la mayoría de los casos (alrededor de 62000 ocurrencias de un total de 280000) se ubicaron en el rango entre 12 y 15 dBm. Finalmente, la cobertura alcanzada por el sistema del escenario 2 fue en promedio de 510 m.

Simulación 2.2

Las figuras 4.10 (a, b, c y d) muestran los resultados estadísticos tras simular 10000 veces la simulación 2.2, para las condiciones establecidas en la tabla 4.5.

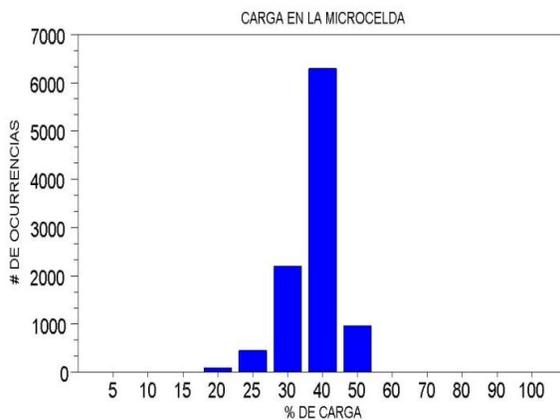


Figura 4.10(a). Factor de carga.

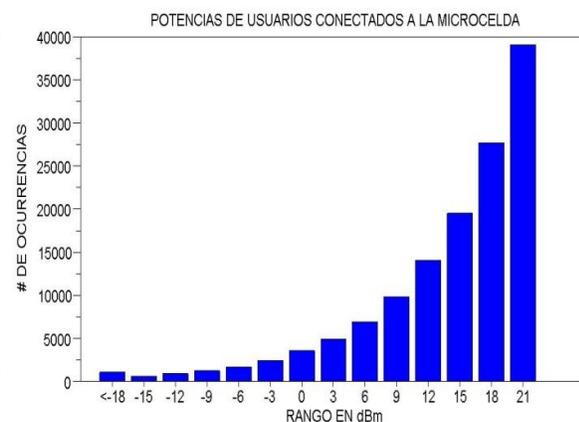


Figura 4.10(b). Potencias de transmisión.

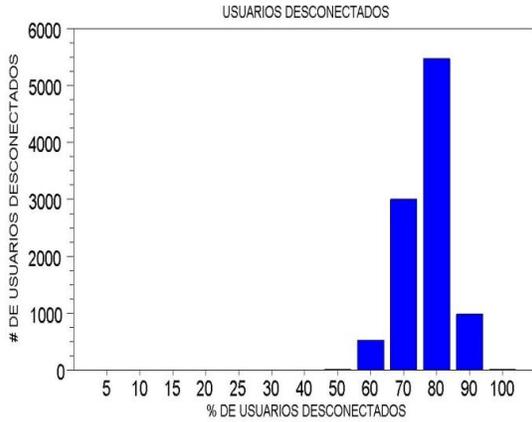


Figura 4.10(c). Probabilidad de degradación.

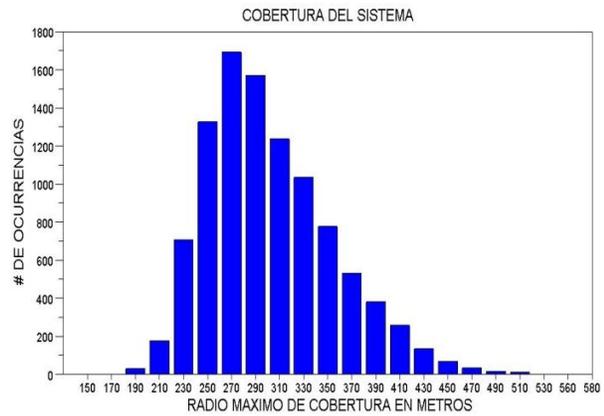


Figura 4.10(d). Cobertura en la microcelda.

La figura 4.10 muestra que el incremento de usuarios hace que el sistema adquiera una mayor carga debido al aumento de la interferencia dentro del sistema, lo que hace que los UEs deben transmitir con mayor nivel de potencia para ser escuchados por la microcelda, tanto así que muchos de ellos superan el valor máximo de 21 dBm por lo cual pasan a ser usuarios a los que no se les presta el servicio (usuarios desconectados), dando como resultado que el sistema entre en degradación. De igual manera, la cobertura se reduce al pasar de 510 a 270 metros.

Simulación 2.3

La figura 4.11 muestra los resultados estadísticos tras simular 10000 veces la simulación 2.3, para las condiciones establecidas en la tabla 4.5, en la cual no se realiza control de potencia y por ello todos los usuarios transmiten con el valor máximo de potencia (21 dBm). En la misma figura se observa que la carga del sistema es del 100%, lo que indica que al no aplicar control de potencia, la interferencia que se presenta en este tipo de sistema es demasiado alta.

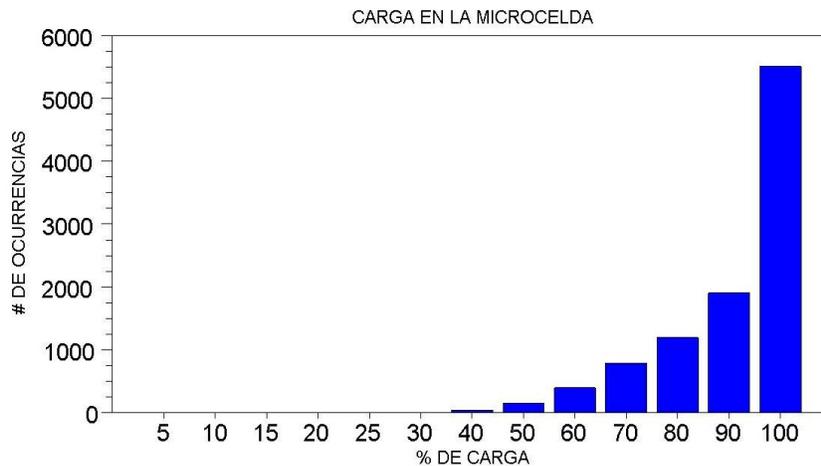


Figura 4.11. Factor de carga.



A continuación se presenta la tabla 4.7 donde se resumen los valores promedio obtenidos de cada una de las variables de las tres simulaciones del escenario 2.

Tabla 4.7. Cuadro comparativo escenario 2.

MICROCELDA	¿Se aplica control de potencia?	Número de usuarios	Factor de Carga	Potencias de transmisión	Probabilidad de degradación	Cobertura
Simulación 2.1	SI	20	≤ 5%	15 dBm	≤ 5%	510 m
Simulación 2.2	SI	47	40%	21 dBm	80%	270 m
Simulación 2.3	NO	20	100%	N.A.	N.A.	N.A.

De la tabla 4.7 se observa que la cobertura del sistema se disminuye como consecuencia del aumento de la carga, notándose el compromiso entre cobertura-capacidad, como dos parámetros que son inversamente proporcionales. En cuanto a los resultados que se obtienen al no aplicar control de potencia, se observa como el sistema se encuentra con una elevada carga, lo cual limita el número de usuarios a los cuales se les brinda servicio.

4.2.4.2.3 Escenario 3: Microcelda y femtocelda

Este escenario presenta la participación de ambos tipos de nodos B: microcelda y femtocelda, con el fin de analizar el comportamiento a nivel de sistema, de la interacción de ambas celdas, y cómo puede verse afectada o beneficiada la microcelda, al introducir dentro de su área de cobertura a la femtocelda. En el escenario de simulación, de 800 x 800 metros, se ubican aleatoriamente (con distribución uniforme) un número determinado de usuarios, como se muestra en la figura 4.12.

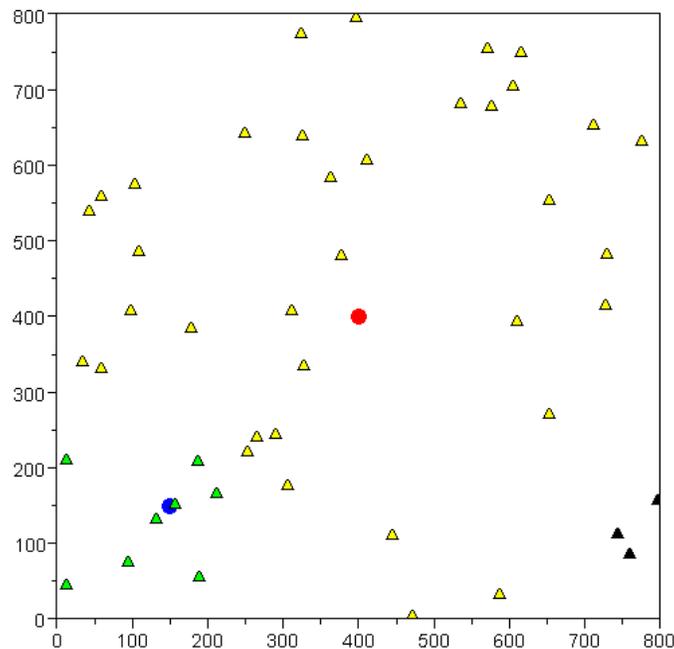


Figura 4.12. Escenario 3 de simulación: microcelda y femtocelda.



Simulación 3.1

Las figuras 4.13 (a, b, c, d, e y f) muestran los resultados estadísticos tras simular 10000 veces la simulación 3.1, para las condiciones establecidas en la tabla 4.5. La gráfica estadística de la cobertura de la femtocelda no se presenta, ya que pocos usuarios se conectan a dicho nodo B obstaculizando la obtención de resultados estadísticos válidos.

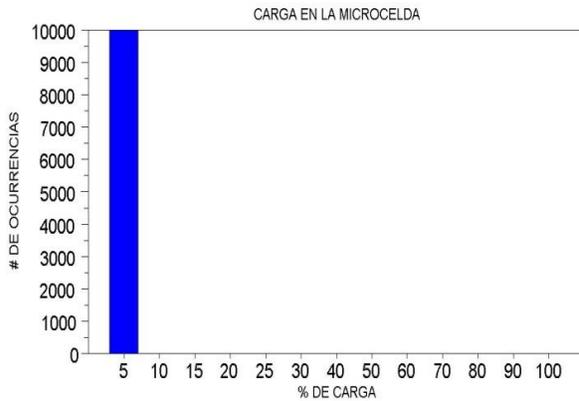


Figura 4.13(a). Factor de carga en la microcelda.

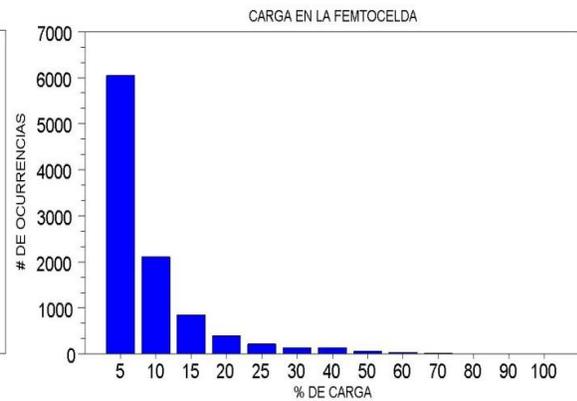


Figura 4.13(b). Factor de carga en la femtocelda.

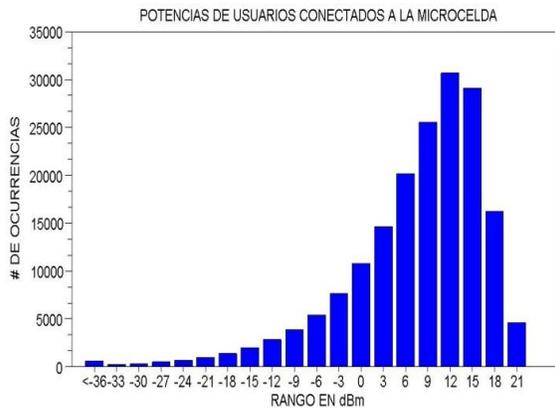


Figura 4.13(c). Potencias de transmisión en la microcelda.

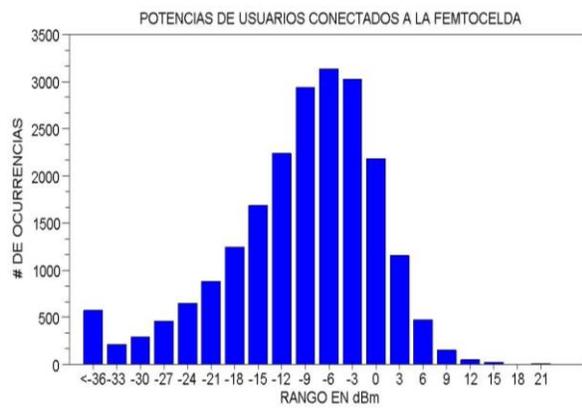


Figura 4.13(d). Potencias de transmisión en la femtocelda.

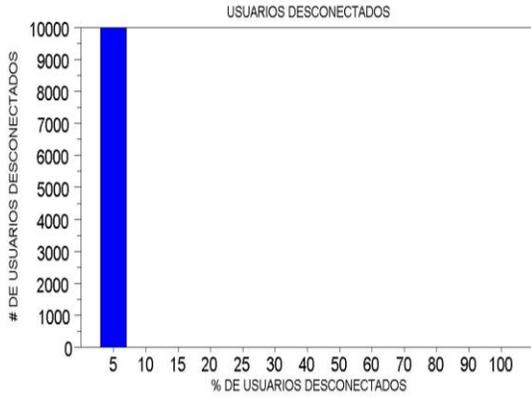


Figura 4.13(e). Probabilidad de degradación del sistema.

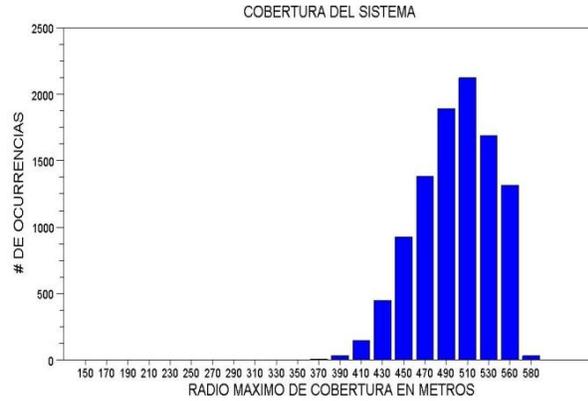


Figura 4.13(f). Cobertura del sistema respecto a la microcelda.

Se observa en las figuras 4.13 que el factor de carga tanto en la microcelda como en la femtocelda, es bajo (valor promedio del 5%). De igual manera, las potencias que los usuarios utilizan en transmisión son bajas, especialmente para los usuarios que se conectan a la femtocelda. El número de usuarios desconectados es bajo, representado por una probabilidad de degradación menor al 5%. Finalmente, la cobertura alcanzada por el sistema fue en promedio de 510 m para los usuarios conectados a la microcelda, por lo que se puede concluir que el sistema presenta un comportamiento aceptable para las características establecidas en la simulación.

Simulación 3.2

Las figuras 4.14 (a y b) muestran los resultados estadísticos tras simular 10000 veces la simulación 3.2, para las condiciones establecidas en la tabla 4.5, en la cual no se realiza control de potencia y por ello todos los usuarios transmiten con el valor máximo (21 dBm). Puede observarse que la carga del sistema es del 100%, lo que indica que al no aplicar control de potencia, la interferencia que se presenta en este tipo de sistema es demasiado alta.

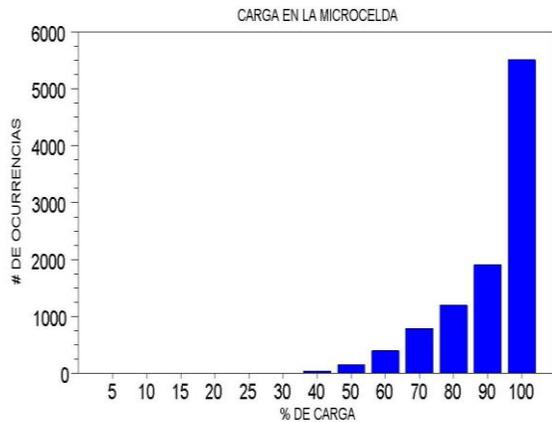


Figura 4.14(a). Factor de carga en la microcelda.

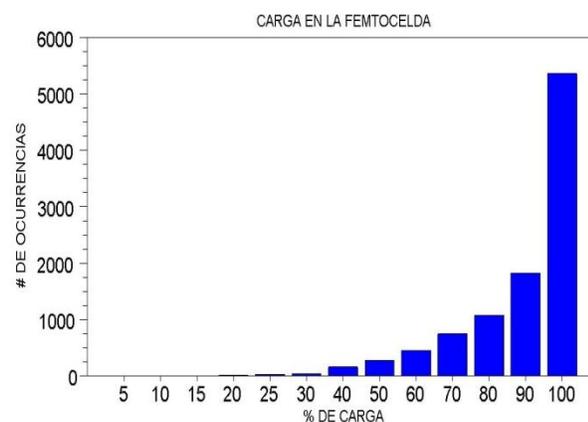


Figura 4.14(b). Factor de carga en la femtocelda.



Simulación 3.3

Las figuras 4.15 (a, b, c, d, e y f) muestran los resultados estadísticos tras simular 10000 veces la simulación 3.3, para las condiciones establecidas en la tabla 4.5.

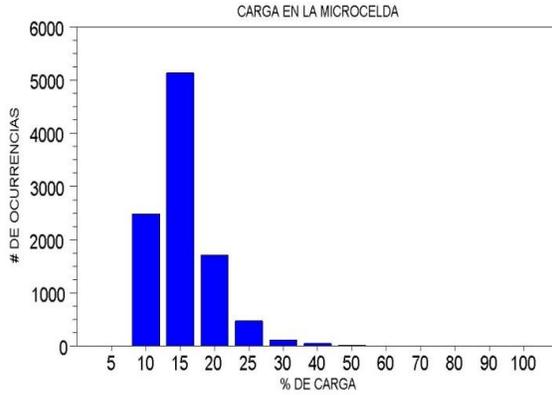


Figura 4.15(a). Factor de carga en la microcelda.

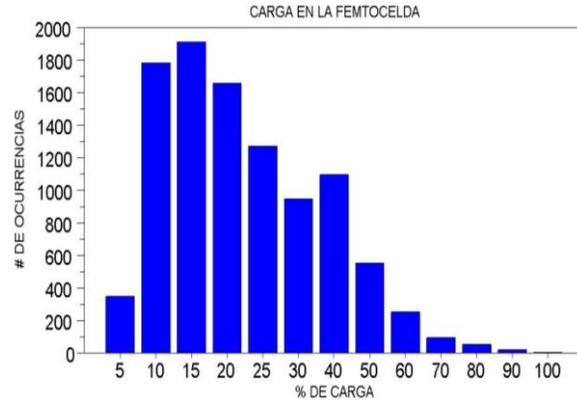


Figura 4.15(b). Factor de carga en la femtocelda.



Figura 4.15(c). Potencias de transmisión en la microcelda.

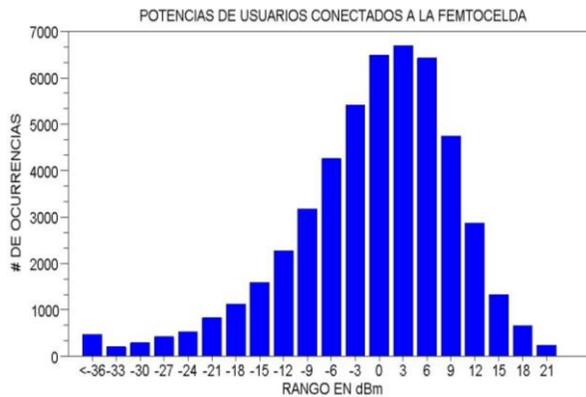


Figura 4.15(d). Potencias de transmisión en la femtocelda.

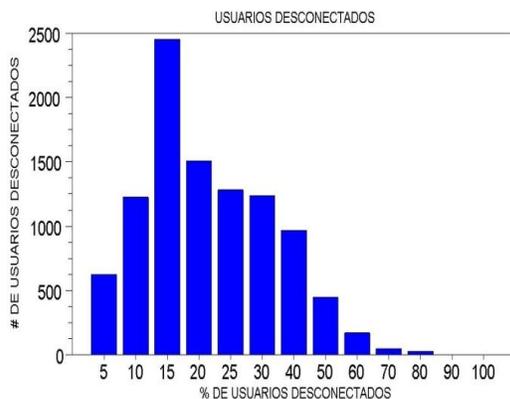


Figura 4.15(e). Probabilidad de degradación del sistema.

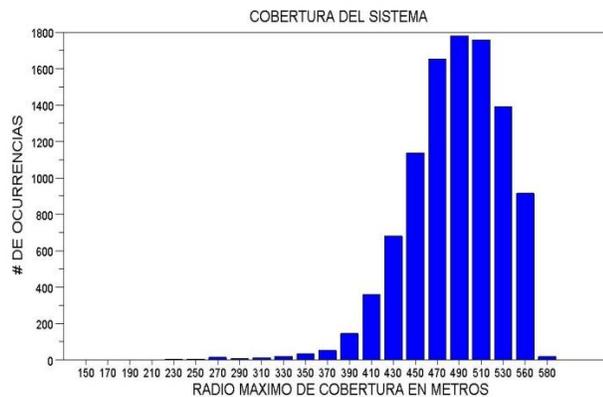


Figura 4.15(f). Cobertura del sistema respecto a la microcelda.



Puede observarse que aún cuando el sistema soporta el número máximo de usuarios (47 UEs), la carga en las celdas no supera el 50%, esto se debe a que la carga total es compartida entre los dos nodos B, sin embargo, la probabilidad de degradación aumentó considerablemente como consecuencia del incremento de la interferencia, lo cual hace que el sistema se encuentre en degradación.

Simulación 3.4

Las figuras 4.16 (a, b, c, d, e y f) muestran los resultados estadísticos tras simular 10000 veces la simulación 3.4, para las condiciones establecidas en la tabla 4.5.

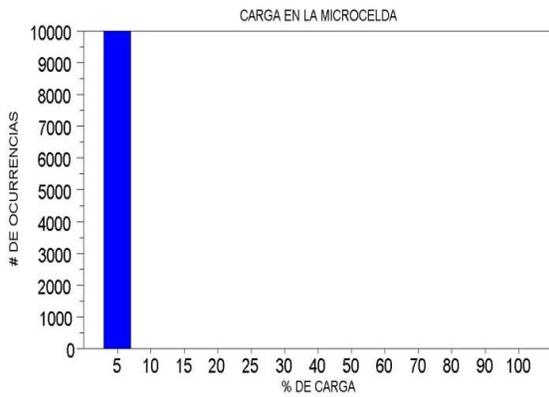


Figura 4.16(a). Factor de carga en la microcelda.

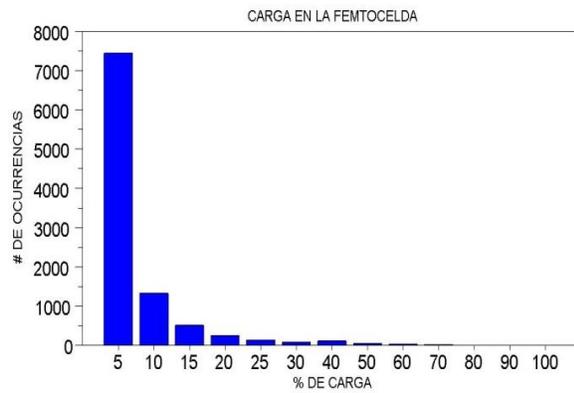


Figura 4.16(b). Factor de carga en la femtocelda.

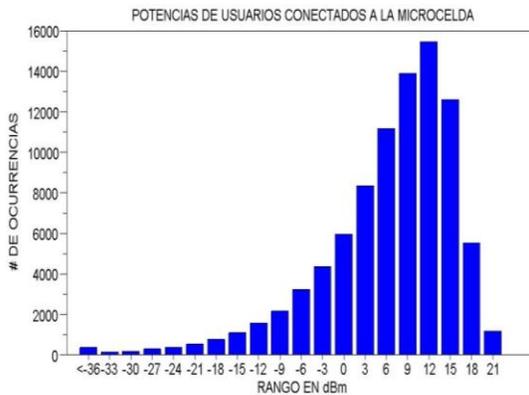


Figura 4.16(c). Potencias de transmisión en la microcelda.

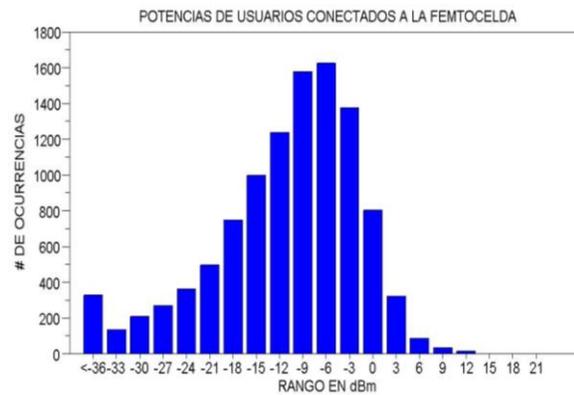


Figura 4.16(d). Potencias de transmisión en la femtocelda.

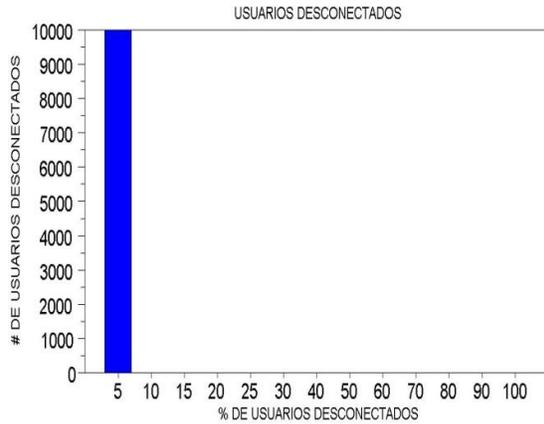


Figura 4.16(e). Probabilidad de degradación del sistema.

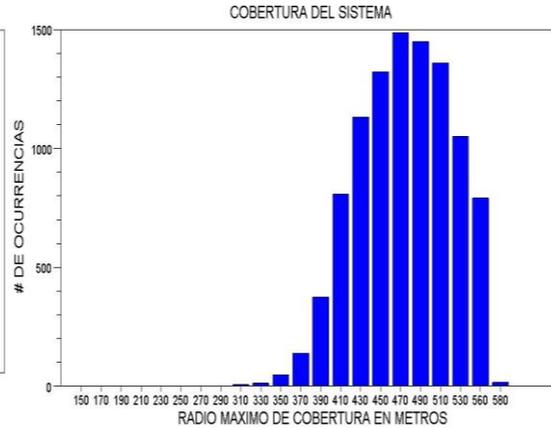


Figura 4.16(f). Cobertura del sistema respecto a la microcelda.

A continuación se presenta la tabla 4.8 donde se resumen los valores promedio obtenidos de cada una de las variables de las tres simulaciones del escenario 3.

Tabla 4.8. Cuadro comparativo escenario 3.

MICROCELDA Y FEMTOCELDA	¿Se aplica control de potencia?	Número de usuarios	Factor de Carga		Potencias de transmisión		Probabilidad de degradación	Cobertura
			MC	FC	MC	FC		
Simulación 3.1	SI	20	≤ 5%	5%	15 dBm	- 3 dBm	≤ 5%	530 m
Simulación 3.2	NO	20	100%	100%	21 dBm	21 dBm	N.A.	N.A.
Simulación 3.3	SI	47	15%	15%	21 dBm	3 dBm	15%	490 m
Simulación 3.4	SI	10	≤ 5%	5%	12 dBm	- 6 dBm	≤ 5%	470 m

De la tabla 4.8 se observa como el incremento del número de usuarios afecta el sistema elevando la carga e incrementando la interferencia del sistema, lo que hace que los usuarios deban transmitir con mayores niveles de potencia para ser escuchados por el nodo B al que se conectan; dichos niveles de potencia llegan a ser tan altos que algunos superan el valor máximo establecido, por lo que estos usuarios se desconectan, aumentando la probabilidad de degradación del sistema. Así mismo, la cobertura del sistema se ve afectada como consecuencia del aumento de la carga, a excepción de la simulación 3.4, donde se observa una disminución en el radio de cobertura, esto se debe a que la mayoría de los UEs se ubicaron a distancias más cercanas a la microcelda.

En la simulación 3.2 en la cual no se realiza control de potencia, el sistema cuenta con una alta carga superando el valor recomendado del 50%. Puede notarse entonces que el control de potencia es fundamental para el buen funcionamiento u operación de un sistema ya que mejora su desempeño, en cuanto reduce la carga del sistema incrementando su capacidad, a la vez que se aumenta la cobertura alcanzada.



4.2.4.3 Comparación entre Escenarios a 12.2 Kbps.

Para comprender el comportamiento del sistema gobernado por una microcelda, tras la introducción de una femtocelda, se debe hacer un análisis comparativo donde se evalúen los resultados obtenidos para cada una de las variables, con el fin de determinar si cumplen o no con los parámetros establecidos, y determinar así si la femtocelda tiene un efecto favorable o desfavorable sobre el desempeño del sistema, en términos de capacidad y cobertura.

A continuación se presenta la tabla 4.9, que incluye los valores obtenidos en las simulaciones 1.1, 2.1 y 3.1, correspondientes a los escenarios, 1,2 y 3, respectivamente.

Tabla 4.9. Comparación entre escenarios para 20 usuarios.

Comparación 1	¿Se aplica control de potencia?	Número de usuarios	Factor de Carga		Potencias de transmisión		Probabilidad de degradación	Cobertura
			MC	FC	MC	FC		
Simulación 1.1	SI	20	N. A.	≤ 5%	N. A.	- 3 dBm	≤ 5%	190 m
Simulación 2.1	SI	20	≤ 5%	N. A.	15 dBm	N. A.	≤ 5%	510 m
Simulación 3.1	SI	20	≤ 5%	5%	12 dBm	- 6 dBm	≤ 5%	510 m

Puede observarse que para un número reducido de usuarios, el sistema tiene un comportamiento adecuado en cuanto mantiene sus variables por debajo de los niveles establecidos, como lo son: el factor de carga por debajo del 50%, las potencias de transmisión por debajo de 21 dBm, y la probabilidad de degradación por debajo del 5%; para finalmente ofrecer valores de cobertura adecuados al rango establecido para un sistema microcelular.

La tabla 4.10 resume los resultados obtenidos en las simulaciones 1.2, 2.2 y 3.3, de los escenarios 1, 2 y 3, respectivamente.

Tabla 4.10. Comparación entre escenarios para 47 usuarios.

Comparación 2	¿Se aplica control de potencia?	Número de usuarios	Factor de Carga		Potencias de transmisión		Probabilidad de degradación	Cobertura
			MC	FC	MC	FC		
Simulación 1.2	SI	47	N. A.	70%	N. A.	15 dBm	≤ 5%	210 m
Simulación 2.2	SI	47	40%	N. A.	21 dBm	N. A.	80%	270 m
Simulación 3.3	SI	47	15%	15%	21 dBm	3 dBm	15%	490 m

Para el número máximo de usuarios que el sistema puede soportar (47 UEs clase 4), se observa que al realizar una comparación entre los resultados obtenidos en cada escenario, femtocelular, microcelular y la combinación de ambos, los factores de carga son relativamente altos en el caso del escenario 1 y del escenario 2; pero, cuando la



femtocelda es introducida en al área de cobertura de la microcelda, la femtocelda ayuda a soportar algunos usuarios, reduciendo la carga en la microcelda y viceversa, según el concepto de “compartición de carga”. Como consecuencia de ello, se observa una reducción en la carga tanto en la microcelda, como en la femtocelda, hasta ubicarse por debajo del 50% establecido.

Del mismo modo, se observa que para el sistema microcelular del escenario 2 se reduce el valor de los usuarios desconectados, representado por la probabilidad de degradación del sistema. Además, la cobertura alcanzada por la microcelda se ve incrementada, tras la introducción de la femtocelda, demostrando que esta acción tiene un efecto favorable sobre el desempeño del sistema, en términos de capacidad y cobertura.

4.2.4.4 Pruebas a Diferentes Velocidades de Transmisión de Datos.

Con el fin de realizar un mejor análisis al algoritmo de control ideal de potencia planteado, se realizaron simulaciones a partir de diferentes velocidades de transmisión de datos y variando el número de usuarios, con el fin de observar los efectos sobre la capacidad y cobertura del sistema.

4.2.4.4.1 Plan de pruebas

Las pruebas realizadas se presentan en las tablas 4.11, 4.13 y 4.15, donde se plantean diferentes escenarios de simulación que incluyen a la femtocelda, la microcelda, y una combinación de ambas, para velocidades de transmisión de datos de 64, 144 y 384 Kbps, las cuales soportan servicios de comunicación de datos.

Se debe tener en cuenta que el aumento en la velocidad de transmisión, trae como consecuencia el aumento del valor de la SIR objetivo generando una reducción en el número de usuarios con llamadas activas.

- **Velocidad de transmisión 64 Kbps**

Tabla 4.11. Plan de pruebas para una velocidad de transmisión de 64 Kbps.

Velocidad de transmisión	Escenarios	Simulaciones	Control de potencia	Gráficas estadísticas	# de usuarios
64 Kbps	Escenario 1 Femtocelda	Simulación 4.1	SI	Carga	11
				Potencias de usuarios	
				% degradación	
				Cobertura	
		Simulación 4.2	SI	Carga	20
				Potencias de usuarios	
				% degradación	
				Cobertura	



	Escenario 2 Microcelda	Simulación 5.1	SI	Carga	11	
				Potencias de usuarios		
				% degradación		
				Cobertura		
		Escenario 3 Microcelda y femtocelda	Simulación 6.1	SI	Carga	11
					Potencias de usuarios (Microcelda)	
					Potencias de usuarios (Femtocelda)	
					% degradación	
		Escenario 3 Microcelda y femtocelda	Simulación 6.2	SI	Carga	20
					Potencias de usuarios (Microcelda)	
Potencias de usuarios (Femtocelda)						
% degradación						
				Cobertura		

A continuación se presenta la tabla 4.12 en donde se presenta un resumen de los resultados obtenidos al realizar 10000 veces las simulaciones del plan de pruebas propuesto para una velocidad de transmisión de datos de 64 Kbps.

Tabla 4.12. Cuadro comparativo para una velocidad de transmisión de datos de 64 Kbps.

Velocidad de transmisión 64 Kbps		¿Se aplica control de potencia?	Número de usuarios	Factor de Carga		Potencias de transmisión		Probabilidad de degradación	Cobertura
				MC	FC	MC	FC		
Escenario 1 Femtocelda	Simulación 4.1	SI	11	N. A.	10%	N. A.	-3 dBm	≤ 5%	190 m
	Simulación 4.2	SI	20	N. A.	50%	N. A.	6 dBm	≤ 5%	190 m
Escenario 2 Microcelda	Simulación 5.1	SI	11	10%	N. A.	15 dBm	N. A.	≤ 5%	490 m
	Simulación 5.2	SI	20	40%	N. A.	21 dBm	N. A.	20%	410 m
Escenario 3 Microcelda y femtocelda	Simulación 6.1	SI	11	10%	5%	15 dBm	- 3 dBm	≤ 5%	470 m
	Simulación 6.2	SI	20	25%	40%	21 dBm	0 dBm	5%	490 m

De la tabla 4.12 se puede observar que al incrementar el número de usuarios con llamadas activas, la carga del sistema se incrementa, esto se debe a que cuanto mayor sea el número de usuarios mayor será la interferencia presente en el sistema. De igual manera, cabe resaltar las ventajas, en cuanto a probabilidad de degradación, cobertura y niveles de potencia de transmisión de los usuarios, que conllevan el introducir una



femtocelda dentro de un escenario gobernado por una microcelda (simulación 5.2 y simulación 6.2).

- **Velocidad de transmisión 144 Kbps**

Tabla 4.13. Plan de pruebas para una velocidad de transmisión de 144 Kbps.

Velocidad de transmisión	Escenarios	Simulaciones	Control de potencia	Gráficas estadísticas	# de usuarios	
144 Kbps	Escenario 1 Femtocelda	Simulación 7.1	SI	Carga	4	
				Potencias de usuarios		
				% degradación		
				Cobertura		
	Escenario 2 Microcelda	Simulación 7.2	SI	SI	Carga	11
					Potencias de usuarios	
					% degradación	
					Cobertura	
	Escenario 2 Microcelda	Simulación 8.1	SI	SI	Carga	4
					Potencias de usuarios	
					% degradación	
					Cobertura	
	Escenario 2 Microcelda	Simulación 8.2	SI	SI	Carga	11
					Potencias de usuarios	
					% degradación	
					Cobertura	
Escenario 3 Microcelda y femtocelda	Simulación 9.1	SI	SI	Carga	4	
				Potencias de usuarios (Microcelda)		
				Potencias de usuarios (Femtocelda)		
				% degradación		
Escenario 3 Microcelda y femtocelda	Simulación 9.2	SI	SI	Carga	11	
				Potencias de usuarios (Microcelda)		
				Potencias de usuarios (Femtocelda)		
				% degradación		
				Cobertura		

A continuación se presenta la tabla 4.14 en donde se presenta un resumen de los resultados obtenidos al realizar las simulaciones del plan de pruebas propuesto para una velocidad de transmisión de datos de 144 Kbps.



Tabla 4.14. Cuadro comparativo para una velocidad de transmisión de datos de 144 Kbps.

Velocidad de transmisión 144 Kbps		¿Se aplica control de potencia?	Número de usuarios	Factor de Carga		Potencias de transmisión		Probabilidad de degradación	Cobertura
				MC	FC	MC	FC		
Escenario 1 Femtocelda	Simulación 7.1	SI	4	N. A.	15%	N. A.	0 dBm	≤ 5%	170 m
	Simulación 7.2	SI	11	N. A.	50%	N. A.	9 dBm	≤ 5%	190 m
Escenario 2 Microcelda	Simulación 8.1	SI	4	15%	N. A.	15 dBm	N. A.	≤ 5%	410 m
	Simulación 8.2	SI	11	40%	N. A.	21 dBm	N. A.	30%	390 m
Escenario 3 Microcelda y femtocelda	Simulación 9.1	SI	4	15%	5%	15 dBm	3 dBm	≤ 5%	410 m
	Simulación 9.2	SI	11	40%	10%	21 dBm	- 9 dBm	5%	410 m

De la tabla 4.14 se observa que para garantizar un 5% en la probabilidad de degradación, el número de usuarios con llamadas activas se redujo a 4 usuarios, exceptuando la simulación 9.2 en donde con 11 usuarios se logra un valor promedio de 5% de probabilidad de degradación, además de incrementar la cobertura, lo cual refleja las ventajas del escenario 3.

- Velocidad de transmisión 384 Kbps**

Tabla 4.15. Plan de pruebas para una velocidad de transmisión de 384 Kbps.

Velocidad de transmisión	Escenarios	Simulaciones	Control de potencia	Gráficas estadísticas	# de usuarios
384 Kbps	Escenario 1 (Femtocelda)	Simulación 10.1	SI	Carga	1
				Potencias de usuarios	
				% degradación	
				Cobertura	
	Escenario 2 (Microcelda)	Simulación 10.2	SI	Carga	4
				Potencias de usuarios	
				% degradación	
				Cobertura	
	Escenario 1 (Femtocelda)	Simulación 11.1	SI	Carga	1
				Potencias de usuarios	
				% degradación	
				Cobertura	
Escenario 2 (Microcelda)	Simulación 11.2	SI	Carga	4	
			Potencias de usuarios		
			% degradación		
			Cobertura		



	Escenario 3 (Microcelda y femtocelda)	Simulación 12.1	SI	Carga		1
				Potencias de usuarios (Microcelda)		
				Potencias de usuarios (Femtocelda)		
				% degradación		
				Cobertura		
		Simulación 12.2	SI	Carga		4
				Potencias de usuarios (Microcelda)		
				Potencias de usuarios (Femtocelda)		
				% degradación		
				Cobertura		

A continuación se presenta la tabla 4.16 en donde se presenta un resumen de los resultados obtenidos al realizar las simulaciones del plan de pruebas propuesto para una velocidad de transmisión de datos de 384 Kbps. Al simular con una velocidad de transmisión tan alta, el número de usuarios con llamadas activas se reduce a 1, para lograr el 5% de probabilidad de degradación.

Tabla 4.16. Cuadro comparativo para una velocidad de transmisión de datos de 384 Kbps.

Velocidad de transmisión 384 Kbps		¿Se aplica control de potencia?	Número de usuarios	Factor de Carga		Potencias de transmisión		Probabilidad de degradación	Cobertura
				MC	FC	MC	FC		
Escenario 1 Femtocelda	Simulación 10.1	SI	1	N. A.	25%	N. A.	3 dBm	≤ 5%	150 m
	Simulación 10.2	SI	4	N. A.	60%	N. A.	9 dBm	≤ 5%	170 m
Escenario 2 Microcelda	Simulación 11.1	SI	1	25%	N. A.	21 dBm	N. A.	5%	390 m
	Simulación 11.2	SI	4	50%	N. A.	21 dBm	N. A.	25%	370 m
Escenario 3 Microcelda y femtocelda	Simulación 12.1	SI	1	25%	5%	18 dBm	3 dBm	5%	390 m
	Simulación 12.2	SI	4	50%	5%	21 dBm	3 dBm	5%	370 m

La introducción de la femtocelda en el radio de cobertura de la microcelda mejora notoriamente la probabilidad de degradación del sistema, manteniendo el valor promedio en el 5% para la simulación 12.2.

De las tablas comparativas 4.12, 4.14 y 4.16, se observa la relación inversamente proporcional entre la capacidad y la cobertura, ya que con el aumento de las velocidades de transmisión de datos la capacidad se incrementa, mientras que por otro lado los radios de cobertura de los distintos escenarios se ven disminuidos, complementando el análisis de cobertura realizado en el capítulo 3.



4.2.4.4.2 Relación capacidad vs cobertura

En la tabla 4.17 se concluye el número de usuarios con los cuales se garantiza una probabilidad de degradación menor al 5% y un factor de carga inferior al 50%, aplicado a cada escenario y para cada una de las velocidades de transmisión, con el fin de resaltar los valores de cobertura alcanzados por el sistema cuando su desempeño se considera óptimo, y así determinar la relación existente entre la capacidad y la cobertura.

Tabla 4.17. Cuadro comparativo para diferentes velocidades de transmisión de datos

Escenario	Velocidad de transmisión	Número de usuarios	Factor de carga		Cobertura
			MC	FC	
Escenario 1 (Femtocelda)	12.2 Kbps	20	N.A.	≤ 5%	190 m
	64 Kbps	11	N.A.	10%	190 m
	144 Kbps	4	N.A.	15%	170 m
	384 Kbps	1	N.A.	25%	150 m
Escenario 2 (Microcelda)	12.2 Kbps	20	≤ 5%	N.A.	510 m
	64 Kbps	11	10%	N.A.	490 m
	144 Kbps	4	15%	N.A.	410 m
	384 Kbps	1	25%	N.A.	390 m
Escenario 3 (Microcelda y femtocelda)	12.2 Kbps	20	≤ 5%	5%	530 m
	64 Kbps	11	10%	5%	470 m
	144 Kbps	4	15%	5%	410 m
	384 Kbps	1	25%	5%	390 m

A partir de la tabla 4.17 se pueden concluir las siguientes relaciones:

- El incremento en la capacidad representado por el aumento en las velocidades de transmisión de datos, reduce el radio de cobertura del sistema, siguiendo la relación inversamente proporcional que manejan estos dos parámetros.
- El incremento en la velocidad de transmisión de datos, genera un incremento en el valor de SIR objetivo, obligando al sistema a reducir el número de usuarios con llamadas activas cumpliendo el requerimiento del 5% de probabilidad de degradación.



5

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN

El trabajo realizado enfocó sus esfuerzos en la implementación de un control ideal de potencia para analizar el comportamiento de un sistema WCDMA al introducir una femtocelda, como punto de acceso radio 3G, dentro del área de cobertura de una microcelda, y determinar los efectos de la interferencia en términos de capacidad y cobertura de todo el sistema. Con esta finalidad, se recurre al concepto de Control de Potencia, desarrollado para mitigar los efectos de la interferencia de banda ancha, que limitan la operación y funcionamiento de los sistemas WCDMA.

De tal manera, se desarrolló una simulación básica, estática, a nivel de sistema, que presenta un escenario microcelular urbano, para el cual se definen características y parámetros propios de las redes WCDMA, los cuales permiten obtener resultados estadísticamente válidos y presentar un análisis acerca de las limitaciones de un sistema WCDMA, compensadas a partir del control de potencia y la asignación celular.

En este capítulo se presentan las conclusiones y las recomendaciones sobre futuras líneas de investigación que pueden desprenderse del análisis aquí realizado, con el fin de brindar continuidad a los estudios enfocados en las señales y sistemas de acceso y difusión basados en radio.

5.2 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos y los análisis realizados en el presente trabajo permiten plantear las siguientes conclusiones:

- Las femtoceldas como tecnología estandarizada por el 3GPP, son pequeñas estaciones base denominadas Nodos B de Hogar, las cuales ofrecen ventajas técnicas y económicas en el momento de ser utilizadas como “puntos de acceso de



radio 3G”, ya que mejoran las conexiones de los móviles en ambientes interiores, fortaleciendo la cobertura y mejorando la calidad de la comunicación.

- Como dispositivos de tercera generación (3G), las femtoceldas proporcionan altas velocidades de transmisión de datos a los usuarios de sistemas de comunicación móvil celular, incrementando adicionalmente la capacidad para redes micro y/o pico celulares de los sistemas 3G, a la vez que garantizan una mejor calidad en los servicios ofrecidos con un nivel de potencia menor por parte de los móviles, lo cual a su vez genera un menor consumo de energía y por lo tanto una mayor autonomía de operación de los dispositivos móviles, un menor riesgo al usuario por posibles efectos de exposición a radiación electromagnética y menor interferencia.
- El hecho de introducir una femtocelda dentro del área de cobertura de una microcelda en un sistema que cumple las especificaciones del estándar WCDMA (UMTS) en modo FDD, reduce la carga de todo el sistema e incrementa la capacidad del mismo, a la vez que se observa un considerable aumento en la cobertura a nivel general.
- La aplicación de un control ideal de potencia implicó plantear y solucionar un sistema lineal de ecuaciones, logrando gestionar la interferencia al evitar efectos como el fenómeno cerca-lejos y la sobrecarga del sistema. De igual manera se mejoró el comportamiento del mismo en términos de capacidad y cobertura.
- El incremento en la capacidad de un sistema se ve representado en el aumento de la velocidad de transmisión de datos del servicio ofrecido o por el incremento en el número de usuarios atendidos, lo cual reduce considerablemente el radio de cobertura de todo el sistema, siguiendo la relación inversamente proporcional existente entre estos dos parámetros.
- Del mismo modo, establecer un incremento en la velocidad de transmisión de datos, implica aumentar el valor de SIR objetivo requerido en el sistema, lo que obliga a reducir el número de usuarios con llamadas activas, con el fin de garantizar el requerimiento del 5% en la probabilidad de degradación.
- Durante la evaluación del número máximo de usuarios que el escenario propuesto podía soportar cumpliendo los parámetros establecidos del sistema, en cuanto a E_b/N_0 requerido, probabilidad de degradación y factor de carga, pudo observarse que el incremento del número de usuarios eleva la carga del sistema e incrementa la interferencia al interior del mismo, lo que hace que los usuarios deban transmitir con mayores niveles de potencia para ser escuchados por el nodo B al que se conectan; dichos niveles de potencia llegan a ser tan altos que algunos usuarios superan el valor máximo establecido, por lo que deben ser desconectados, aumentando la probabilidad de degradación del sistema.
- 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 dispositivos reales.

- La simulación aquí presentada servirá como herramienta de soporte para los procesos de enseñanza y aprendizaje en el área de los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricas, específicamente en el de sistemas de tercera generación basados en WCDMA (UMTS). Por su relativa sencillez, será una base y una guía para el desarrollo de trabajos futuros.

5.3 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Los resultados obtenidos a partir del 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 y sistemas de acceso y difusión basados en radio. Para ello se propone:

- Buscar aplicar un algoritmo de control ideal de potencia más eficiente, con el cual se reduzcan los recursos computacionales para realizar una simulación dinámica (donde se tenga en cuenta la evolución temporal) con el fin de analizar el comportamiento del sistema planteado y evaluar las mejoras obtenidas.
- De manera conjunta con la simulación a nivel de sistema (*System Level*) presentada, se recomienda evaluar el desempeño a nivel de enlace (*Link Level*), en el cual se evalúa la conexión entre una estación base y un terminal móvil para las direcciones de enlace ascendente y/o descendente, y evaluando a través de medidas de desempeño, tales como BER, BLER y número de retransmisiones, de manera que estos resultados sirvan como parámetros de entrada a la simulación a nivel de sistema.
- Existen otros aspectos como el control de admisión, el control de congestión, el planificador y el control de traspasos, los cuales al igual que el control de potencia, permiten maximizar el desempeño de la red en términos de capacidad y cobertura, por lo cual se recomienda la aplicación de algunos de estos algoritmos, que son parte de la Gestión de Recursos Radio propuestos para sistemas WCDMA.
- Explorar otras herramientas de simulación, como MatLab o GNU Octave, o simuladores como NPSW, Radio Mobile, Wireless Insite, EDX, entre otros, los cuales incluyen librerías con una completa funcionalidad para la simulación de los sistemas de comunicaciones inalámbricos más utilizados.
- Profundizar en el estudio de conceptos que no fueron considerados en el desarrollo de este proyecto, como lo son: diversidad de antena en transmisión y/o en recepción (sistemas MIMO), diversidad de tiempo y/o diversidad de frecuencia.



- Considerar un escenario propio de los ambientes interiores, en el cual se evalúen las pérdidas sufridas por la señal, las cuales dependan estrictamente de la construcción propia del edificio en particular en el que se desarrolla la comunicación; para ello se deben considerar detalles como el número de paredes y pisos que la señal debe atravesar, las características de los materiales de los mismos, etc., siendo recomendable el uso de técnicas como las basadas en el trazado de rayos.
- Considerar una estructura tipo Manhattan para una red microcelular, en donde las ganancias de antenas dependan del patrón de radiación y su inclinación, usando tecnologías que busquen limitar la interferencia del sistema como la Detección Multiusuario.
- El país está en el proceso de implementación y desarrollo de sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación 3G y 3.5G, por lo cual el estudio de tecnologías como WCDMA y femtoceldas, es tan importante para contribuir con el desarrollo de las telecomunicaciones orientadas hacia la línea de investigación en Señales y Sistemas de Acceso y Difusión basados en Radio.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://www.3gamericas.org/>
- [2] L. Mendo; Tesis Doctoral “Capacidad en Sistemas Celulares W-CDMA”; Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- [3] K. Tachikawa; “WCDMA Mobile communications System”; Editorial John Wiley & Sons, Ltd. 2002.
- [4] <http://www.umtsforum.net>
- [5] <http://www.umtsworld.com>
- [6] <http://www.umts-forum.org>
- [7] J. Rojas; Artículo “WCDMA”. Disponible en: http://www.tecnologiahechapalabra.com/tecnologia/glosario_tecnico/articulo.asp?i=839 [Revisado diciembre 10, 2009].
- [8] J. M. Huidrobo; “(W)CDMA: acceso múltiple por división de códigos”; Diciembre de 2002. Disponible en: http://www.networkworld.es/_W_CDMA:-acceso-multiple-por-division-de-codigos/seccion-/articulo-143920 [Revisado diciembre 12, 2009].
- [9] D. Fajardo; Tesis profesional “Simulación de tramas de WCDMA”; Universidad de Las Américas, Puebla, México; mayo de 2004.
- [10] H. Holma, A. Toskala; “WCDMA for UMTS, Radio Access for Third Generation Mobile Communication”; Editorial John Wiley & Sons, Tercera Edición. 2004.
- [11] R.C. Dixon, “Spread Spectrum Systems”; Editorial John Wiley & Sons. 1984
- [12] C. Chevallier, C. Brunner, A. Garavaglia, K. P. Murray, K. R. Baker; “WCDMA (UMTS) Deployment Handbook: Planning and Optimization Aspects”; Editorial Jhon Wiley & Sons, 2006.
- [13] F. A. Rodríguez; “*Spread Spectrum, Ganancia de Procesamiento y la Protección contra Interferencia: ‘Antijamming’*”; Disponible en: Boletín del Centro Naval, Número 821, Julio/Septiembre de 2008, pags. 327–332.



- [14] Especificación Técnica del 3GPP TS 25.212, versión 9.1.0; “*Multiplexing and 102ersio coding (FDD) (Release 9)*”; diciembre de 2009.
- [15] B. Sklar; “*Digital Communication Fundamentals and Applications*”; Editorial Prentice Hall.
- [16] J. Korhonen; “*Introduction to 3G Mobile Communication*”; Editorial Artech House, Estados Unidos, 2001.
- [17] Especificación Técnica del 3GPP TS 25.213, versión 3.4.0; “*Spreading and modulation (FDD), (Release 9)*”. 2009.
- [18] E. M. Palacios; Tesis profesional “*Redes Inalámbricas de 2G, 2.5G y 3G*”; Universidad de Las Américas, Puebla, México; mayo de 2004.
- [19] Especificación Técnica del 3GPP TS 25.104 versión 9.2.0; “*Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD) (Release 9)*”; diciembre de 2009.
- [20] Q. Zhang; “*Method and System for Spreading and Scrambling Downlink Physical Channels*”; enero de 2007. Disponible en: <http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?IA=US2006026228&DISPLAY=DESC> [Revisado diciembre 19 de 2009].
- [21] R. Akl, S. Nguyen; “*UMTS Capacity and Throughput Maximization for Different Spreading Factors*”; Disponible en: Journal of Networks, Vol. 1, No. 3, Julio de 2006.
- [22] J. Huélamo; “*Visión Arquitectural de la Tercera Generación de Móviles UMTS*”; Octubre de 2000. Disponible en: http://www.umtsforum.net/mostrar_articulos.asp?u_action=display&u_log=15 [Revisado diciembre 18, 2009].
- [23] M. Kiril, Z. Dus Ko; “*Principles of the UMTS Terrestrial Radio Access Network – UTRAN*”; Noviembre de 2001. Disponible en: <http://www.telfor.rs/telfor2001/radovi/11-14.pdf> [Revisado diciembre 17 de 2009].
- [24] Especificación técnica 3GPP TS 25.101, version 9.2.0 “*User Equipment (UE) radio transmission and reception (FDD) Release 2009*” Diciembre 2009.
- [25] J. Feuerstein, T. S. Rappaport; “*Wireless personal communications*”; Editorial Kluwer Academic Publishers.
- [26] Especificación Técnica del 3GPP 25.104 versión 4.14.0; “*Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD) (Release 5)*”; diciembre de 2007.



- [27] J. M. Huidobro; “*Qué es Femtoceldas*”; Agosto de 2008. Disponible en: Revista Bit, ISSN 0210-3923, N°. 170, 2008, pags. 50-52, Universidad de la Rioja. <http://www.coit.es/publicaciones/bit/bit170/50-52.pdf> [Revisado junio 7, 2009].
- [28] <http://www.femtoforum.org>
- [29] R. Allan; “*Femtocells get ready to invade Homes and Offices*”; Noviembre de 2008 Disponible en: http://mobiledevdesign.com/tutorials/femtocell_ap_basestations_home_office-1117/index.html; Pags. 1-4 [Revisado septiembre 7, 2009].
- [30] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, A. A. Gatherer; “*Femtocell Networks: A Survey*”; Disponible en: Revista IEEE Communications, Vol. 46, No. 9, Septiembre de 2008. Pags. 59-67.
- [31] M. Singh, “*Integrating Femtocells with Existing Wireless Infrastructure*”; Disponible en: <http://www.ccpu.com/news/articles/200802-femtocellintegrate.html> [Revisado septiembre 9, 2009].
- [32] “CFP – IEEE Communications Magazine Feature Topic on Femto Cells”. Disponible en: <http://www.comsoc.org/livepubs/ci1/info/cfp/cfpcommag0909.htm> [Revisado junio 5, 2009]
- [33] “*Femtocell Shipments to Surge*”. Disponible en: <http://www.3g.co.uk/PR/August2009/Femtocell-Shipments-to-Surge-3G.html> [Revisado agosto 26, 2009].
- [34] Airvana white paper “*Femtocells: Transforming The Indoor Experience*” Octubre de 2007. Disponible en: http://www.airvana.com/files/Airvana_Femtocell_White_Paper_Oct_2007.pdf [Revisado enero 12, 2010].
- [35] <http://www.airvana.com>
- [36] Especificación Técnica del 3GPP 25.467 versión 9.1.0; “*UTRAN architecture for 3G Home Node B (HNB)*”; Diciembre de 2009.
- [37] P. Stavroulakis; “*Interference Analysis and Reduction for Wireless System*”; Editorial Artech House, 2003.
- [38] C. Botella, G. Piñero, M. de Diego, A. González, N. Cardona; “*Influencia de la Interferencia de Acceso Múltiple en un Entorno WCDMA de Antenas Distribuidas*”; Universidad Politécnica de Valencia, 2002. Disponible en:



http://www.gtac.upv.es/Abstracts\Abstract_Carmen\Abstract_URSIS05_Carmen.pdf
[Revisado diciembre 12, 2009].

- [39] M. A. Salam; “*Reduction of cochannel interference in WCDMA cellular systems*”; Noviembre de 2005. Disponible en: http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V25-4HG670G-1&_user=4173194&_coverDate=09/30/2005&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000062480&_version=1&_urlVersion=0&_userid=4173194&md5=b1959957bfdd09128e63089a95af2303 [Revisado diciembre 12, 2009].
- [40] T. Mayer, C. Robertson, y T. T. Ha; “*Co-channel interference reduction on the forward channel of a wideband CDMA cellular system*”. Diciembre de 1999. Disponible en: http://www.research.telcordia.com/society/TacCom/papers99/26_1.pdf [Revisado enero 15, 2010].
- [41] T. Isotalo, J. Niemelä, J. Borkowski, J. Lempiäinen; “*Impact of Pilot Pollution on SHO Performance*”; Disponible en: <http://www.cs.tut.fi/tit/RNG/publications/docs/topology/SHOpPPpDT.pdf> [Revisado enero 25, 2010].
- [42] A. Navarro; Trabajo de Investigación “*Factores que afectan la capacidad en WCDMA y su influencia en la planificación de sistemas de tercera generación*”. Disponible en: <http://cita2003.fing.edu.uy/articulosvf/25.pdf> [Revisado junio 17, 2009].
- [43] J. C. Sáez; “Una Arquitectura Hardware Flexible para Estimación de Relación Señal a Interferencia en sistemas WCDMA”. Disponible en http://www.coit.es/pub/ficheros/telefonica_b687e164.pdf [Revisado enero 30 de 2010].
- [44] Á. G. Baltazar, R. Medina, A. E. Montiel; “*Sistemas de Telefonía Móvil basados en el estándar WCDMA*”; 2007. Disponible en: <http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/55/1/TEESISbaltazarsanchez.pdf> [Revisado enero 31 de 2010].
- [45] J. Laiho, A. Wacker; “Radio Network Planning and Optimisation for UMTS”; Editorial Jhon Wiley & Sons, 2006.
- [46] Especificación Técnica del 3GPP 25.848 versión 4.0.0; “*Physical layer aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access (Release 4)*”; marzo de 2001.
- [47] M. R. Karim, M. Sarraf; “W-CDMA and cdma2000 for 3G mobile networks”; Editorial McGraw-Hill.



- [48] H. F. Geerdes; "UMTS Radio Network Planning Mastering Cell Coupling for Capacity Optimization"; Editorial Vieweg + Teubner Research.
- [49] P. M. de Alwis "Call Admission Control and Resource Utilization in WCDMA Networks"; febrero de 2005. Disponible en: http://www.cosc.canterbury.ac.nz/research/reports/MastTheses/2005/mast_0502.pdf [Revisado febrero 5, 2010].
- [50] J. M. García, J. M. Riera, N. Ruiz, D. Martínez; "Optimización de algoritmos de traspaso con continuidad en el sistema UMTS de tercera generación". Disponible en: http://w3.iec.csic.es/ursi/articulos_modernos/articulos_gandia_2005/articulos/CMo3/605.pdf [Revisado febrero 10, 2010].
- [51] TSG-RAN Encuentro # 4 del grupo de trabajo 2, TSG R2#4(99)37; Berlin, Mayo de 1999. Disponible en: http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG2_RL2/TSGR2_04/Docs/Pdf/r2-99378.pdf [Revisado Abril 20, 2010].
- [52] K. Sipila, Z. C. Honkasalo, J. Laiho, A. Wacker "Estimation of Capacity and Required Transmission Power of WCDMA Downlink Based on a Downlink Pole Equation"; Disponible en: <http://www-csite.deis.unibo.it/htdida/sistra/Approfondimento/umts1.pdf> [Revisado enero 23, 2009].
- [53] J. M. H. Rábanos; "Comunicaciones Móviles"; Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, S.A., 1997.
- [54] J. C. García, O. A. Rodríguez, J. L. Castillo; "Desempeño de Modelos de Propagación en Comunicación Móvil para la zona de Caldas Parte 1: Modelos para áreas urbanas"; Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales; Disponible en: <http://www.docentes.unal.edu.co/jcgarciaa/docs/Papers/ID016.pdf> [Revisado marzo 03 de 2010].
- [55] Reporte Técnico del ETSI, TR 101 112 versión 3.1.0; "Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS"; Noviembre de 1997.
- [56] <http://www.scilab.org/>
- [57] <http://www.gnu.org/>