

**UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Tesis previa a la Obtención del
Título de Ingeniero Electrónico

TÍTULO:

**“ANALISIS DE LA IMPLEMENTACION DE FEMTOCELDAS PARA
MEJORAR LA CAPACIDAD DE UN OPERADOR MOVIL”**

AUTORES:

PAUL ENRIQUE GUAMÁN GUAMÁN

ADRIAN FABRICIO PEÑAFIEL CÁCERES

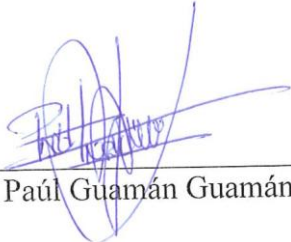
DIRECTOR:

EDGAR OCHOA FIGUEROA

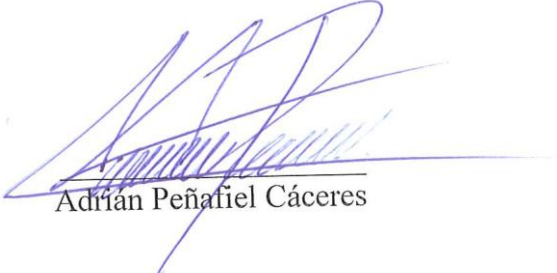
CUENCA - ECUADOR

2014

Los conceptos, análisis y conclusiones desarrollados en el presente trabajo, son de completa responsabilidad de los autores.



Paúl Guamán Guamán

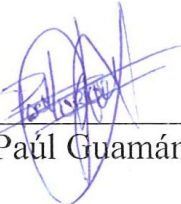


Adrián Peñafiel Cáceres

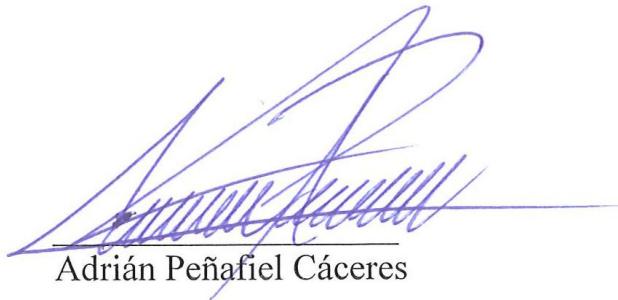
DECLARACIÓN

Nosotros, Paúl Enrique Guamán Guamán y Adrián Fabricio Peñafiel Cáceres, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.



Paúl Guamán Guamán



Adrián Peñafiel Cáceres

CERTIFICACION

Certifico que el trabajo “ANALISIS DE LA IMPLEMENTACION DE FEMTOCELDAS PARA MEJORAR LA CAPACIDAD DE UN OPERADOR MOVIL”. Realizado por Paúl Enrique Guamán Guamán y Adrián Fabricio Peñafiel Cáceres, fue desarrollado bajo mi supervisión.



Ing. Edgar Ochoa Figueroa

DEDICATORIA

Este trabajo quiero dedicar a mi hija Camila, por ser mi fuente de inspiración, a mi mami Ale por estar allí siempre en las buenas y en las malas, a mis Padres por su incondicional apoyo, a mis hermanos Santy y Mary por creer en mí, a mi tío Marco por sus acertados consejos y su ayuda en el transcurso de mi vida.

Paúl

Es un gesto de alegría el poder dedicar este proyecto a mis Padres que siempre me apoyaron en las buenas y en las malas a conseguir este objetivo tan anhelado en mi vida ya que gracias a sus consejos y su abnegación durante todo este tiempo han sido una fuerza y una gran motivación para nunca darme por vencido y culminar esta meta.

Adrián

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haber puesto en mi camino a aquellas personas que marcaron mi camino, con el fin de lograr mis metas sin echar un paso al costado.

Agradeceré hoy y siempre a mi papas Enrique y Mercedes, quienes si bien no me dieron riquezas pero me dieron lo suficiente para salir adelante en mis estudios y cumplir mis metas, a mi abuelita Ale y mi tío Marco quienes me supieron reprender y enderezar mi camino con sus sabios consejos, a mis hermanos, primos y tíos quienes de una u otra forma me han enseñado con su ejemplo a superarme y no quedarme rezagado.

A mis amigos, en especial a Daniel, Adrián, Adriancho, Yolanda, Oscar, Fernando, gracias por estar allí cuando he necesitado con quien llorar o con quien celebrar.

Al Ing. Edgar Ochoa Figueroa por su valioso apoyo en la realización de este trabajo y por la confianza depositada al creer en mí.

Paúl

Primero ante todo agradezco a Dios por darme una gran familia, especialmente a mis padres Patricio y Ruth por apoyarme de una manera incondicional y darme la oportunidad de culminar un objetivo muy importante en mi vida, de igual forma a mis hermanos que me han apoyado en lo posible, así como a todos mis tíos y tías, mis abuelitos y mis primos que siempre han estado a mi lado en las buenas y aun mas en las malas.

De igual forma agradecer a todos mis amigos y amigas que a lo largo de mi vida siempre han estado para apoyarme en todo lo posible con sus consejos, especialmente a mi compañero de tesis Paul Guaman.

De manera especial agradecer a mi director de tesis el Ing. Edgar Ochoa Figueroa quien con su experiencia y gran conocimiento en el tema nos brindo su ayuda para resolver y aclarar dudas y culminar de la mejor manera este proyecto de tesis.

Adrián

RESUMEN

Desde la aparición del sistema celular móvil, las tecnologías han ido evolucionando con el transcurso del tiempo, desde la generación 1G (transmisión de voz), hasta la ahora existente 4G (alta velocidad en transmisión de datos). La aceptación ha permitido la evolución ya que se ha buscado nuevas formas de acceder al sistema celular, utilizando de una manera más eficiente el espectro radioeléctrico, satisfacer la demanda y cubrir las necesidades requeridas por los usuarios.

Debido al gran crecimiento de usuarios en las redes celulares conformadas por macroceldas, la capacidad se ve comprometida al llegar a un punto de saturación en la que no se puede brindar servicio a todos los usuarios dentro del área de cobertura. Es por esta necesidad que se ha buscado alternativas en las que se pueda resolver este inconveniente sin comprometer la calidad del servicio. Una solución viable frente a esta problemática ha sido la creación de celdas cada vez más pequeñas, es aquí donde nace el concepto de Femtoceldas.

Una femtocelda es una BS en escala menor, misma que permite una pequeña área de cobertura con la necesidad de una conexión ADSL para poder enlazarse con la red celular, las cuales pueden ser utilizadas tanto en ambientes indoor como outdoor.

Esta tesis hace un enfoque a la convivencia macro-femtocelda, teniendo como objetivo primordial el no reemplazar un sistema macrocelular, sino aumentar la capacidad de esa área de cobertura servida por la red macro, sin comprometer el funcionamiento de los dos sistemas.

Se ha desarrollado un software para simular los diferentes escenarios en los cuales se tiene presente la interferencia co-canal, como de canal adyacente, producidas tanto por la macrocelda como por la femtocelda, para determinar la capacidad teórica que puede servir la femtocelda ya sea en un enlace uplink o downlink. El mismo software permite ver cómo afecta el GoS en la convivencia macro-femtocelda, para ello se usa los datos obtenidos en las simulaciones del escenario en el peor de los casos.

El análisis económico hace un enfoque a la recuperación de la inversión con datos supuestos. Para este análisis se enfoca en empresas que tengan mala cobertura en indoor.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vii
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tablas.....	xii
GLOSARIO DE TERMINOS.....	xiii
CAPÍTULO 1.....	1
1. EL CONCEPTO CELULAR.....	1
1.1 CARACTERISTICAS DE LOS SISTEMAS CELULARES.....	1
1.1.1 Área de Cobertura.....	1
1.1.2 Servicios.....	2
1.1.3 Uso del espectro.....	2
1.1.4 Bajo consumo de potencia.....	2
1.2 TECNICAS DE ACCESO AL MEDIO.....	2
1.2.1 FDMA.....	2
1.2.2 TDMA.....	3
1.2.3 CDMA.....	4
1.2.4 OFDMA.....	5
1.2.5 SC-FDMA.....	6
1.3 TECNOLOGIAS EN EL SISTEMA CELULAR.....	6
1.3.1 PRIMERA GENERACION, 1G.....	6
1.3.2 SEGUNDA GENERACION, 2G.....	7
1.3.3 2.5 GENERACION, 2.5 G.....	8
1.3.4 TERCERA GENERACION, 3 G.....	8
1.3.5 CUARTA TERCERA GENERACION, 4 G.....	9
1.4 ARQUITECTURAS.....	9
1.4.1 ARQUITECTURA DE UNA RED GSM (2G).....	11
1.4.2 ARQUITECTURA DE UNA RED GSM/GPRS.....	15
1.4.3 ARQUITECTURA DE UNA RED UMTS (3G).....	18
1.4.4 ARQUITECTURA DE UNA RED LTE (4G).....	21

1.5	REUSO DE FRECUENCIA Y DIVISION DE CELDA	23
1.5.1	REUSO DE FRECUENCIAS.....	24
1.5.2	RELACIÓN C/I Y FACTOR REDUCCIÓN –INTERFERENCIA.....	26
1.5.3	DIVISIÓN DE CELDAS (MICRO CELDAS)	28
1.5.4	TRUNKING Y GRADO DE SERVICIO.....	30
CAPÍTULO 2.....		32
2.	SISTEMAS FEMTOCELDAS.....	32
2.1	ESTADO DEL ARTE.....	33
2.2	DEFINICIÓN DE FEMTOCELDA.....	34
2.2.1	ARQUITECTURA DE UNA FEMTOCELDA	35
2.3	ASPECTOS TECNICOS DE LAS FEMTOCELDAS	36
2.4	GESTION DE INTERFERENCIAS.....	37
2.4.1	ESTANDARIZACION POR EL 3GPP.....	37
2.5	INTERACCION ENTRE MACRO Y FEMTO CELDA	40
2.5.1	CARACTERISTICAS PROPIAS DE UNA FEMTOCELDA.....	40
2.5.2	ESCENARIOS POSIBLES DE INTERFERENCIA.....	41
2.6	HAND IN & HAND OUT	43
CAPÍTULO 3.....		45
3.	MODELOS DE PROPAGACION Y PARAMETROS DE SIMULACION.....	45
3.1	PROPAGACION EN INTERIORES, MODELO MULTI-PARED	45
3.2	PROPAGACIÓN EN EXTERIORES, MODELO HATA COST231	46
3.3	DESVANECIMIENTO POR SOMBRA	47
3.4	PARÁMETROS DE SIMULACIÓN	48
CAPÍTULO 4.....		49
4.	CAPACIDAD DE LAS FEMTOCELDAS.....	49
4.1	CAPACIDAD DE LAS FEMTOCELDAS CON CANAL DEDICADO	49
4.1.1	ENLACE ASCENDENTE	49
4.1.2	ENLACE DESCENDENTE.....	55
4.2	CAPACIDAD DE LAS FEMTOCELDAS CON CANAL COMPARTIDO... ..	58
4.2.1	ENLACE ASCENDENTE	58
4.2.2	ENLACE DESCENDENTE.....	60
4.3	CALCULO DE LA CAPACIDADES EN UN CANAL DEDICADO.....	62
4.3.1	CAPACIDAD ENLACE ASCENDENTE	62

4.3.2	CAPACIDAD ENLACE DESCENDENTE.....	68
4.4	CALCULO DE LA CAPACIDADES EN UN CANAL COMPARTIDO .	71
4.4.3	CAPACIDAD ENLACE ASCENDENTE	71
4.4.4	CAPACIDAD ENLACE DESCENDENTE.....	77
4.5	MEJORA DE LA CAPACIDAD DE UN OPERADOR MOVIL	81
CAPITULO 5		85
5.	ANALISIS COSTO – BENEFICIO DE LA IMPLEMENTACION DE FEMTOCELDAS	85
5.1	COSTO DE LA IMPLEMENTACION DE FEMTOCELDAS.....	85
5.1.1	MATERIALES Y EQUIPOS.	85
5.1.2	ESTIMACION DE LA INVERSION.....	86
5.1.3	ESTIMACION DE COSTO POR LLAMADAS e INGRESOS	87
5.1.4	RECUPERACION DE LA INVERSION.....	89
5.2	BENEFICIOS GENERADOS PARA EL USUARIO COMO PARA EL OPERADOR MOVIL	89
5.2.1	BENEFICIOS PARA EL USUARIO	89
5.2.2	BENEFICIOS PARA EL OPERADOR MOVIL	90
VENTAJAS Y DESVENTAJAS		91
VENTAJAS		91
a)	POR PARTE DE UN OPERADOR MOVIL	91
b)	POR PARTE DE UN USUARIO	92
DESVENTAJAS.....		92
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		94
CONCLUSIONES		94
RECOMENDACIONES.....		98
BIBLIOGRAFÍA		99
ANEXOS		102
ANEXO 1 ERLANG B.....		103

Índice de Figuras

Figura 1. 1: División de frecuencia para un numero N de canales, FDMA	3
Figura 1. 2: Evitar interferencia de canal adyacente, FDMA	3
Figura 1. 3: División de tiempo para un numero N de canales, TDMA.....	4
Figura 1. 4: División de código para un numero N de canales, CDMA.....	5
Figura 1. 5: Espectro de una señal OFDMA	6
Figura 1. 6: Arquitectura Genérica de un Sistema Celular.....	10
Figura 1. 7: Subsistemas de una Red GSM	11
Figura 1. 8: Arquitectura de Red GSM/GPRS	15
Figura 1. 9: Pila de Protocolos GPRS	17
Figura 1. 10: Arquitectura de Red UTMS	19
Figura 1. 11: Arquitectura simplificada LTE	22
Figura 1. 12: Distribución de una arquitectura LTE.....	23
Figura 1. 13: Relación D/R.....	24
Figura 1. 14: Celdas amorfas	24
Figura 1. 15: a, Celdas formando un Cluster, b, varios Cluster cubriendo una area	25
Figura 1. 16: Desplazamiento para ubicar celda co-canal.	26
Figura 1. 17: Móvil al borde de una celda.....	27
Figura 1. 18: División de una celda.....	28
Figura 1. 19: Sectorización de una celda, en: (a) 3 sectores, (b) 6 sectores.	30
Figura 1. 20: Sectorización de celdas	30
Figura 2. 1: Conexión de una Femtocelda con una operadora.	34
Figura 2. 2 Arquitectura de un acceso de red HNB.....	35
Figura 2. 3: Gestión de frecuencia entre macro-femtoceldas en una configuración D	40
Figura 4. 1: Análisis del enlace Ascendente canal dedicado. (HeNB_d femtocelda de estudio.- HeNB_m femtocelda interferente).	50
Figura 4. 2: Análisis del enlace Descendente en un canal dedicado. (HeNB_d femtocelda de estudio.- HeNB_m femtocelda interferente).....	56
Figura 4. 3: Análisis del enlace ascendente canal compartido. (Azul .- enlace MUE con la macrocelda. Verde .- señal interferente).....	59
Figura 4. 4: Análisis del enlace descendente canal compartido. (Azul .- enlace FUE con la Femtocelda. Verde .- señal interferente)	60
Figura 4. 5: Escenario 1, Femtocelda brindando servicio a edificio de 3 plantas	63
Figura 4. 6: Escenario 1, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz.	63
Figura 4. 7: Escenario 1, Capacidad de Usuarios del Servicio de Datos.....	64
Figura 4. 8: Escenario 1, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz, con 7 usuarios de Datos.....	64
Figura 4. 9: Escenario 2, femtocelda HeNB_b, femtocelda interferente.....	65
Figura 4. 10: Escenario 2, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz.	66
Figura 4. 11: Escenario 2, Capacidad de Usuarios del Servicio de Datos.....	66

Figura 4. 12: Escenario 2, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz, con 7 usuarios de Datos.....	67
Figura 4. 13: Escenario 3. Femtocelda brindando servicio a un edificio de 3 plantas.	68
Figura 4. 14: Escenario 4. Femtocelda brindando servicio a 3 plantas, con femtocelda HeNB_b interferente.....	69
Figura 4. 15: Escenario 4, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz.	69
Figura 4. 16: Escenario 4,Capacidad de Usuarios del Servicio de Datos.....	70
Figura 4. 17: Escenario 4, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz, con 16 usuarios de Datos.	70
Figura 4. 18: Escenario 5, Femtocelda sirviendo a 3 plantas, con interferencia MUE.	72
Figura 4. 19: Escenario 5,Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz.	72
Figura 4. 20: Escenario 5, Capacidad de Usuarios del Servicio de Datos.....	73
Figura 4. 21: Escenario 5, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz, con 7 usuarios de Datos.....	73
Figura 4. 22: Escenario6, MUE y HeNB_b interferencias.	74
Figura 4. 23: Escenario 6, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz.	75
Figura 4. 24: Escenario 6, Capacidad de Usuarios del Servicio de Datos.....	75
Figura 4. 25: Escenario 6,Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz, con 6 usuarios de Datos.....	76
Figura 4. 26: Escenario 7, eNB interferente	77
Figura 4. 27: Escenario 7,Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz.	77
Figura 4. 28: Escenario 7, Capacidad de Usuarios del Servicio de Datos.....	78
Figura 4. 29: Escenario 7,Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz, con 8 usuarios de Datos.....	78
Figura 4. 30: Escenario 8, eNB & HeNB_b interferencias	79
Figura 4. 31: Escenario 8, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz.	80
Figura 4. 32: Escenario 8, Capacidad de Usuarios del Servicio de Datos.....	80
Figura 4. 33: Escenario 8, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz, con 6 usuarios de Datos.....	81
Figura 4. 34: Interfaz del Software para el cálculo de la Capacidad de la Macrocelda	83
Figura 4. 35: Calculo del GoS, en una red macro-femtocelular	84
Figura 5. 1 Femtocelda Enterprise Cell 9361, Alcatel Lucent.	86

Índice de Tablas

Tabla 1. 1: Protocolos e interfaces en una arquitectura GSM, [10].....	13
Tabla 1. 2: Protocolos e interfaces en una arquitectura GPRS. [10]	17
Tabla 1. 3: Protocolos e interfaces en una arquitectura UMTS. [10]	20
Tabla 1. 4: Valores adecuados para el tamaño de un cluster.....	27
Tabla 3. 1: Parámetros de simulación, [24]	48
Tabla 4. 1: Capacidad de la Femtocelda en el Escenario 1	64
Tabla 4. 2: Capacidad de la Femtocelda en el Escenario 2.	67
Tabla 4. 3: Capacidad de la Femtocelda en el Escenario 3.	68
Tabla 4. 4: Capacidad de la Femtocelda en el Escenario 4.	71
Tabla 4. 5: Capacidad de la Femtocelda en el Escenario 5.	74
Tabla 4. 6: Capacidad de la Femtocelda en el Escenario 6.	76
Tabla 4. 7: Capacidad de la Femtocelda en el Escenario 7.	79
Tabla 4. 8: Capacidad de la Femtocelda en el Escenario 8.	81
Tabla 5. 1: Equipos Femtocelda	85
Tabla 5. 2: Estimación de la Inversión	87
Tabla 5. 3: Tabla de las llamadas cursadas en una Macro celdas.....	88
Tabla 5. 4: Ingreso generado por día de una femtocelda.....	88
Tabla 5. 5: Ingreso generado por día del Sistema Macro- femtocelda	88
Tabla 5. 6: Tabla comparativa de Perdidas por llamadas no cursadas de una Red Macro vs. Red Macro- femtocelda	89
Tabla 5. 7: Ingreso generado por día de 18000 femtoceldas	89

GLOSARIO DE TERMINOS

1G	First Generation	Primera Generación de Telefonía Celular
2G	Second Generation	Segunda Generación de Telefonía Celular
3G	Third Generation	Tercera Generación de Telefonía Celular
3GPP	3rd Generation Partnership Project	Asociación de Proyecto de 3ra Generación
4G	Fourth Generation	Cuarta Generación de Telefonía Celular.
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line	Línea de Abonado Digital Asimétrica
AMPS	Advanced Mobile Phone System	Sistema Telefónico Móvil Avanzado
ATM	Asynchronous Transfer Mode	Modo de Transferencia Asíncrona
AuC	Authentication Center	Centro de Autenticación
BS	Base Station	Estación Base
BSC	Base Station Controller	Controlador de la Estación Base
BSS	Base Station Subsystem	Subsistema de Estación base
BSSGP	BSS GPRS Protocol	Protocolo BSS GPRS
BTS	Base transceiver station	Estación Base Transceptora
CDMA	Code Division Multiple Access	Acceso Múltiple por División de Código
CN	Core Network	Núcleo de Red
CS	Circuit switched	Conmutación de Circuitos
CSG	Closed Subscriber Group	Grupo Cerrado de Abonados
DSL	Digital Subscriber Line	Línea de Abonado Digital
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution	Tasas de Datos Mejoradas para la evolución de GSM
EGPRS	Enhanced GPRS	GPRS Mejorado
EIR	Equipment identity register	Unidad de Registro de Identidad
EMS	Enhanced Messaging Service	Servicio de Mensajería Mejorada
EPC	Evolved Packet Core	Evolución del Núcleo de Paquetes
ePDG	Evolved Packet Data Gateway	Evolución Compuerta Paquete de Datos
EPS	Evolved Packet System	Evolución del Sistema de Paquetes
EUTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network	Evolución Acceso Universal Radioeléctrico Terrestre
FAP	Femtocell Acces Point	Punto de Acceso Femtocelda
FDD	Frequency Division Duplexing	Duplexación por División de Frecuencia
FDMA	Frequency Division Multiple Access	Acceso Múltiple por División de Frecuencia
FUE	Femto User Equipment	Equipo de Usuario Femtocelda
GGSN	Gateway GPRS Support Node	Nodo de Soporte de Compuerta GPRS
GMSC	Gateway MSC	Compuerta de la Central de Conmutación Móvil
GoS	Grade of Service	Grado de Servicio
GPRS	General Packet Radio Service	Servicio General de Paquetes vía Radio
GR	GPRS Register	Registro GPRS
GSM	Global System for Mobile communications	Sistema Global para las comunicaciones Móviles
GSN	GPRS Support Node	Nodo de Apoyo GPRS
GTP	GPRS Tunneling Protocol	Protocolo Túnel GPRS
HLR	Home Location Register	Registro de Ubicación Base
HNB's	Home Node B	Nodo B Casa

HSPA	High-Speed Packet Access	Acceso de Paquetes de Alta Velocidad
HSS	Home Subscriber Server	Servidor de suscriptor Local
IMEI	International Mobile Equipment Identity	Identidad Internacional de Equipo Móvil
IP	Internet Protocol	Protocolo de Internet
ISDN	Integrated Services Digital Network	Red Digital de Servicios Integrados
ISP	Internet Service Provider	Proveedor de Servicio de Internet
LTE	Long Term Evolution	Cuarta Generación de Telefonía móvil
MME	Mobile Management Entity	Entidad de Gestión de Movilidad
MMS	Multimedia Messaging Service	Servicio de Mensajería Multimedia
MS	Movil Station	Estación Móvil
MSC	Mobile Switching Center	Central de Conmutación Móvil
MUE	Macro User Equipment	Equipo de Usuario Macrocela
NAS	All Non Access Stratum	Mensaje de Estrato de No Acceso
NB	Node B	Nodo B
NSS	Network Switching Subsystem	Subsistema de Conmutación de Red
NSS	Network switching subsystem	Subsistema de Conmutación de Red
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal
OMC	Operations and Maintenance Centre	Centro de Operaciones y Mantenimientos
OSS	Operation and Support Subsystem	Sub sistema de Conmutación de Operación
OSVF	Orthogonal Variable Spreading Factors	Factor de Ensanchamiento Variable de Códigos Ortogonales
PCRF	Policy and Charging Rules Function	Políticas y Reglamentos de la Función de Roles
PDN-GW	Packet Data Network Gateway	Compuerta Red de Paquete de Datos
PS	Packet switched	Conmutación de Paquetes
QoS	Quality Of Service	Calidad del Servicio
RF	Radio Frequency	Radio Frecuencia
RNC	Radio Network Controller	Controlador de la Red Radio
RNS	Radio Network Subsystem	Subsistemas de Redes de Radio
Rx	Receptor	Receptor
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Divison Multiple Access	Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única
SCTP	Stream Control Transmission Protocol	Protocolo de Control de Transmisión en Cadena
SGSN	Server GPRS Support Node	Nodo de Soporte de Servidor GPRS
SIM	Subscriber Identity Module	Módulo de Identificación de Abonado
SMS	Short Messaging Service	Servicio de Mensajería Corta
SNDCP	SubNetwork Dependent Convergent Protocol	Protocolo de Convergencia Dependiente de Subred
SNR	Signal to Noise Ratio	Relación Señal a Ruido
SS7	Signalling System No. 7	Sistema de Señalización
TCP	Transmission Control Protocol	Protocolo de Control de Transmisión
TDD	Time Division Duplexing	Duplexación por División de Tiempo
TDM	Time Division Multiplexing	Multiplexación por División de Tiempo
TDMA	Time Division Multiple Access	Acceso Múltiple por División de Tiempo
TIR		Tasa Interna de Retorno
TRAU	Transcoder and Rate Adaptation Unit	Unidad de Transcodificador y Adaptación de Velocidad
Tx	Transmitter	Transmisor

UE	User Equipment	Equipo de Usuario
UHF	Ultra High Frequency,	Frecuencia Ultra Alta
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles
USIM	User SIM	Usuario SIM
UTP	Unshielded Twisted Pair	Par Trenzado No Blindado
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network	Acceso Universal Radioeléctrico Terrestre
VAN		Valor Actual Neto
VHF	Very High Frequency	Frecuencia Muy Alta
VLR	Visitor Location Register	Registro de Ubicación de Visitante
WAN	Wide Area Network	red de área amplia
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access	Acceso Múltiple por División de Código de Banda ancha

CAPÍTULO 1.

1. EL CONCEPTO CELULAR

Uno de las grandes invenciones que ha tenido la humanidad hasta ahora, ha sido las comunicaciones, la evolución que ha tenido esta ha ido a la par con el desarrollo tecnológico.

El servicio de telefonía fija, que tuvo en primera instancia las comunicaciones, no lleno las expectativas frente a las necesidades de las personas, ya que hubo necesidad de tener comunicaciones en diferentes ambientes (lugares lejanos, situaciones en movimiento). Nace la idea de tener un dispositivo que permita tener acceso a la comunicación en cualquier lugar que se encuentre.

Se lanza al mercado un dispositivo móvil que permite tener acceso a las comunicaciones, mismo que tenía como única función la trasmisión de voz, en la actualidad la trasmisión de voz se ha visto desplazada por la transmisión de datos, por lo que las operadoras móviles han visto la necesidad de buscar alternativas los cuales llenen las expectativas de los usuarios.

1.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS CELULARES

Las características de un sistema celular son:

- Área de cobertura
- Servicios
- Uso de espectro.
- Bajo consumo de potencia.

1.1.1 Área de Cobertura

Con el afán de tener una mayor cantidad de usuarios, los operadores móviles han visto la necesidad de instalar BS en sitios estratégicos, los cuales cubren una determinada área geográfica, a la cual se lo denomina área de cobertura. En esta área de cobertura cuando los usuarios se encuentran dentro de ella, pueden acceder a los servicios que brindan los operadores móviles.

1.1.2 Servicios

La telefonía móvil partió brindando un solo servicio, el servicio de voz, pero el desarrollo tecnológico ha permitido que se puedan agregar más servicios en la telefonía móvil, mismos que tienen una gran aceptación por parte de los usuarios.

1.1.3 Uso del espectro

Conseguir espectro por parte de los operadores móviles resulta costoso, además de ser un recurso escaso, por lo que se debe usar este recurso de una manera eficiente. Los operadores móviles han visto la necesidad de que este espectro sea reutilizado cada cierta distancia, y poder así abarcar más áreas de cobertura y poder brindar mejores servicios. [1]

1.1.4 Bajo consumo de potencia

A principios de la telefonía móvil celular, se tenían dispositivos grandes y pesados, esto se debía a las potencias elevadas con las que funcionaban las BS, estas características de los teléfonos móviles ha cambiado con el desarrollo tecnológico y con la aceptación de la telefonía celular. Por lo que los fabricantes de teléfonos celulares, han podido fabricar productos pequeños los cuales pueden brindar más servicios y aplicaciones. [1]

1.2 TECNICAS DE ACCESO AL MEDIO

Debido al limitado espectro disponible que tiene una operadora móvil es imprescindible buscar alternativas las cuales permitan aprovechar al máximo el mismo, ya que no es factible asignar un determinado ancho de banda a un solo usuario.

En la actualidad se dispone de múltiples técnicas de acceso al medio, las cuales permiten acceder a un medio de comunicación, las mismas que indican la forma en la que van a crear los canales para empezar una comunicación. [2]

1.2.1 FDMA

La técnica de acceso FDMA, es basada en la división de su espectro para un cierto número de canales, cuyo canal puede abarcar a varios usuarios.

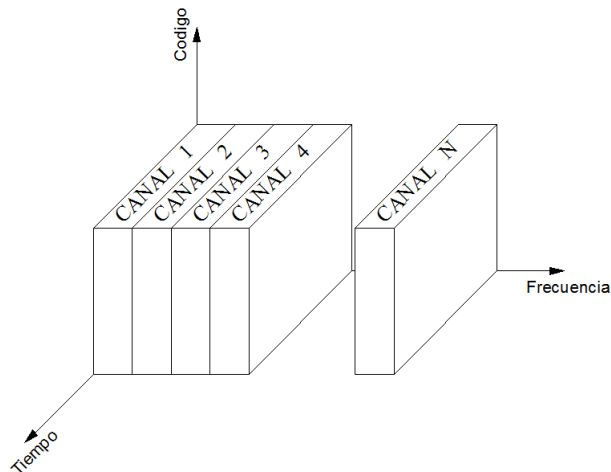


Figura 1. 1: División de frecuencia para un numero N de canales, FDMA

Al hacer la división de canales, también se considera un ancho de banda menor, el mismo que va a estar entre los canales ya divididos, con el fin de evitar posibles interferencias entre canales adyacentes.

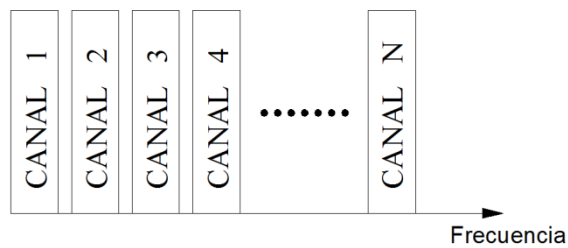


Figura 1. 2: Evitar interferencia de canal adyacente, FDMA

Características de un sistema FDMA:

- Cuando es asignado un canal a un usuario, aunque este no esté ocupado, no se puede asignar a otro usuario.
- Los móviles que funcionan en base a FDMA, usan duplexores en el transmisor y en el receptor, los cuales funcionan al mismo tiempo. [3]

1.2.2 TDMA

La técnica de acceso TDMA, consiste en el uso de una sola portadora la misma que permite dar servicio a varios canales mediante una compartición temporal. En TDMA el espectro es dividido en slots de tiempo, en donde a cada canal se le asigna un slot para transmitir y recibir información. [4]

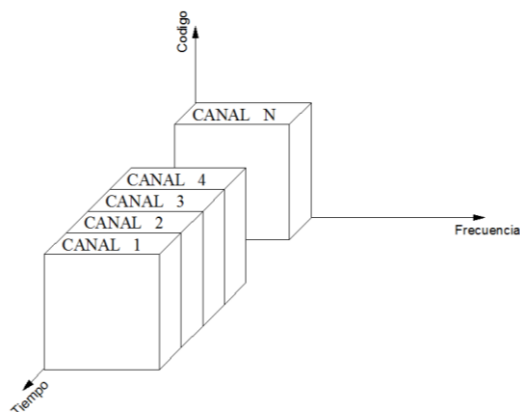


Figura 1. 3: División de tiempo para un numero N de canales, TDMA

En un enlace ascendente, base a móvil, la señal es transmitida mediante TDM, en donde cada MS extrae la información en el intervalo temporal que tiene asignado, obteniendo las referencias de portadora, temporización y sincronización de la trama. En un enlace ascendente, móvil a base, es agregado un tiempo de guarda la cual ayuda a minimizar posibles colisiones entre las tramas que llegan a la BS, ya que cada móvil envía una excesiva cantidad de datos en el tiempo asignado en la trama. [5]

Características de TDMA:

- TDMA comparte una misma portadora para varios usuarios.
- La transmisión de datos no es continua, si no en ráfagas, teniendo como un resultado un bajo consumo de batería.
- En TDMA no se usa duplexores, ya que usa un time slot para subida, y otro para bajada. [3]

1.2.3 CDMA

En CDMA, para el acceso al medio usa una técnica denominado ensanchamiento de la señal, (spreading signal). El ensanchamiento de la señal consiste en la multiplicación de la señal de un mensaje de banda estrecha por una señal de banda ancha a la cual se le agrega un código pseudoaleatorio, este código pseudoaleatorio tiene que ser ortogonal con respecto a los otros códigos. [5]

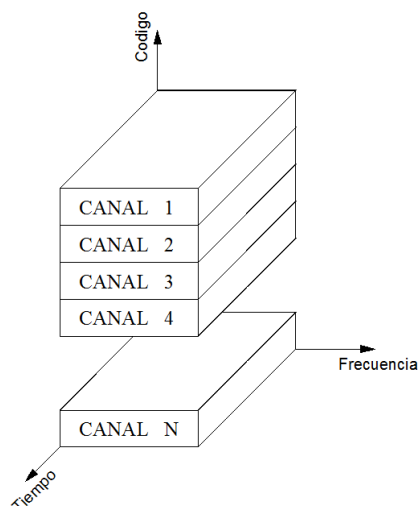


Figura 1. 4: División de código para un número N de canales, CDMA

El receptor tiene que conocer este código emitido por la BS, para poder capturar el mensaje que le pertenece. Las principales características de un sistema CDMA son:

- El espectro puede ser compartido por muchos usuarios.
- El desvanecimiento debido a la multitrayectoria es disminuido debido al ensanchamiento de la señal a lo largo del espectro.
- La capacidad de un sistema CDMA es limitada, debido a que cuando aumenta el número de usuarios aumenta el ruido de una manera lineal. [3]

1.2.4 OFDMA

Este método de acceso es usado en las redes de cuarta generación, LTE, especialmente en un enlace descendente. Este tipo de acceso al medio consiste en asignar una subportadora a cada usuario, permitiendo realizar múltiples transmisiones paralelas.

La modulación utilizada es OFDM, misma que combina varios canales de información en un solo medio de transmisión, esta modulación trata de portadoras ortogonales, permitiendo una transmisión paralela en un rango estrecho de frecuencias y evitando la existencia de interferencias entre ellas. [6]

OFDMA se realiza al dividir un canal, en subcanales, el mismo que contiene un conjunto de soportadoras físicas cuales pueden ser o no adyacentes.

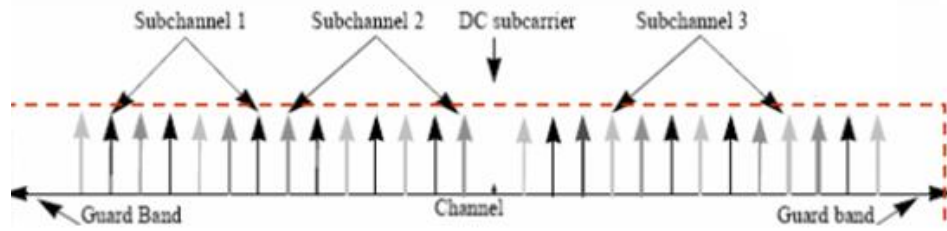


Figura 1. 5: Espectro de una señal OFDMA

1.2.5 SC-FDMA

La técnica SC-FDMA es usado para enlaces ascendentes, en un sistema LTE, a diferencia de OFDMA, SC-FDMA realiza una pre codificación de símbolos antes de transmitir mediante OFDM. [7]

1.3 TECNOLOGIAS EN EL SISTEMA CELULAR

La era de la telefonía móvil empezó brindando el servicio de voz, debido al desconocimiento de una mejor técnica de acceso al medio. Tener un dispositivo móvil resultaba muy costoso por lo que pocos usuarios tenían la posibilidad de acceder a la adquisición del mismo.

Las transformaciones que han tenido las redes celulares, permiten hoy en día brindar no solo el servicio voz, si no están en la capacidad de brindar un servicio de transmisión de datos, debido a la transmisión mediante la conmutación de paquetes. Las redes actuales están en la capacidad de entregar muchos megabits por segundo para cada usuario, cuyo acceso al servicio de datos por lo general se hace desde dispositivos móviles, notebooks, etc. La demanda de ancho de banda y capacidad tiene una tendencia exponencial, ya que cada vez existen más usuarios necesitando de la red con un mayor ancho de banda, debido a las aplicaciones, como transmisión de video o el acceso a internet.

1.3.1 PRIMERA GENERACION, 1G

Antes de empezar con la era celular, un teléfono móvil era usado en camiones o automóviles, donde los transmisores y receptores se colocaban en la parte posterior de los vehículos móviles. Se comercializaban a través de empresas de

comunicaciones alámbricas y empresas de radio comunicaciones. A esta generación se le conoció como Generación Cero, 0G.

A finales de los años setenta, nace la primera generación de la telefonía móvil, cuya tecnología se caracterizó por ser netamente analógica, brindando un único servicio, la transmisión de voz. Esta tecnología empezó accediendo al medio, haciendo uso de FDMA, lo cual de cierta manera limitó el número de usuario.

En esta etapa de la era celular, la seguridad no fue un factor predominante, al ser una tecnología primitiva no se tomó muchas consideraciones. La tecnología usada en la primera generación fue AMPS, misma que fue lanzada por los laboratorios Bell, con AMPS nace el concepto de dividir en celdas un determinado lugar geográfico, y a la vez se asigna una determinada frecuencia a cada celda, de manera que se evite interferencias entre celdas adyacentes y lograr mantener una comunicación en el intercambio de celda, siempre y cuando haya canales disponibles. [2]

1.3.2 SEGUNDA GENERACION, 2G

La limitación del número de usuarios cuando se lanzó la telefonía celular durante la primera generación, conllevó a buscar alternativas en busca de brindar a más usuarios el servicio de telefonía móvil y porque no una mejor calidad. Se optó en cambiar el sistema de acceso, se cambió el sistema analógico a un sistema digital, dando comienzo al uso de TDMA.

Un gran beneficio del sistema digital que se empezó a usar en esta segunda generación, fue que los nuevos diseños de teléfonos móviles empezaron a ser pequeños a diferencia de los teléfonos usados en la primera generación. Esto se debía al bajo consumo de batería por la forma de acceder al medio, (TDMA).

La migración a un sistema digital, pasó a formar parte de la segunda generación de telefonía móvil, las tecnologías usadas en esta era digital fueron GSM, IS-136 (TDMA) E IS-95 (CDMA), cuyos protocolos de codificación son más sofisticados. Estos protocolos empezaron a soportar la transmisión de datos pero su comunicación fue limitada. Los servicios agregados fueron: fax, SMS, datos. [3]

1.3.3 2.5 GENERACION, 2.5 G

El brindar más servicios dentro de la telefonía móvil, conlleva a buscar formas de rápido acceso o formas de tener una mayor velocidad en la transmisión de datos. La tecnología de 2.5G agrega nuevos servicios como EMS y MMS.

EMS es un servicio de mensajes la cual permite agregar iconos y sonidos dentro un mensaje SMS. MMS este tipo de mensajes permite agregar textos, imágenes, sonidos y videos.

Para poder dar estos servicios se tuvo que adoptar las tecnologías GPRS y EDGE se aplicaron a GSM, en cambio en CDMA se dio el paso hacia CDMA 2000 1X. GPRS fue desarrollado para el uso en GSM, este sistema es orientado al tráfico de datos, permite a los usuarios compartir un canal dirigiendo los paquetes desde el Tx al Rx, logrando hacer un mejor uso del canal de comunicaciones, y dando la opción de ofrecer costos reducidos por el uso de los mismos.

La implementación de GPRS beneficia a los operadores de GSM ya que ofrece capacidades IP a la red GSM, permitiendo la conexión a una amplia gama de redes de información pública y privadas utilizando protocolos estándar como TCP/IP.

EDGE, conocido también como EGPRS, es una tecnología que actúa entre las redes de segunda y tercera generación. A diferencia de un sistema GPRS, EDGE introduce un sistema diferente de modulación y una nueva codificación de canal, misma que se puede usar indistintamente para transmitir voz y datos mediante la conmutación de paquetes y circuitos. El usar EDGE la misma estructura de GSM, se lo puede decir que es solo una actualización de software, y se lo puede considerar como una evolución de GPRS. [2]

1.3.4 TERCERA GENERACION, 3 G

El ofrecer servicios como videoconferencias, televisión, internet móvil o descarga de archivos requieren de un servicio con una mayor capacidad en la transmisión de datos, por lo que estas aplicaciones en los sistemas de segunda generación se veían limitados, o nulos en su mayoría.

El desarrollo de una tecnología de tercera generación implicó el cumplir ciertos requerimientos para poder ser llamada una tecnología de tercera generación, requerimientos como:

- 2 Mbps de tasa de transferencia en ambientes cerrados
- 384 kbps en ambientes abiertos

En base a estos requerimientos, hay 3 tecnologías de tercera generación; UMTS que usa WCDMA, CDMA2000 1xEV-DO y CDMA 1xEV-DV, que son una evolución de CDMA2000. [3]

Las tecnologías CDMA2000 1xEV-DO y CDMA 1xEV-DV, usan FDD donde los enlaces de subida y de bajada usan diferentes frecuencias. Mientras que UMTS usa TDD, en los cuales los enlaces de subida y de bajada usan la misma frecuencia pero usan distintos segmentos de tiempo. [8]

1.3.5 CUARTA TERCERA GENERACION, 4 G

En la actualidad se está tratando de migrar toda el sistema telefónico a la red de cuarta generación, conocida como LTE, esta generación de telefonía móvil se la puede definir como all-ip, y además este sistema trata de combinar una gran capacidad multimedia y cuando hay un gran movimiento.

Las tecnologías de transmisión que usa LTE son: OFDMA para un enlace descendente, y SC-FDMA para un enlace ascendente. Con estos medios de accesos se llega a tener en teoría una tasa de 100 Mbps. [7], [2], [9]

1.4 ARQUITECTURAS

Para comprender el funcionamiento de las comunicaciones móviles es necesario realizar un análisis de las diferentes arquitecturas, para ello se ha considerado un modelo de referencia con componentes comunes entre sí (Figura 1.6), desde el cual parte cada una para facilitar el entendimiento además de comprender su proceso evolutivo con el transcurso de los años.

El modelo de referencia se encuentra compuesto por cuatro bloques básicos:

- Equipo de Usuario

- Red de Acceso
- Red Troncal
- Bloque de las otras Redes

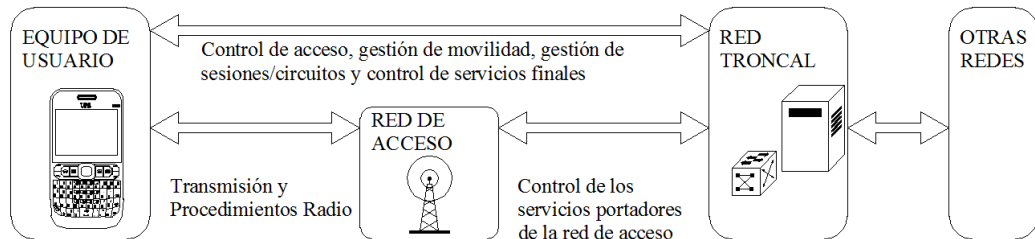


Figura 1. 6: Arquitectura Genérica de un Sistema Celular

Equipo de Usuario: Dispositivo que permite al usuario acceder a los servicios de la Red. Consta de 2 partes, la primera lo que es hardware y software y la segunda corresponde a la tarjeta SIM, que almacena todos los datos personales del suscriptor.

Red de Acceso: Está constituida por el Subsistema de Estación base, la BSS comprende todas las funciones de radio relacionadas con la red. Permite la movilidad del usuario dentro del área de cobertura de la red.

Red Troncal: Es la parte encargada del control de acceso a la red celular (autenticación de los usuarios del sistema), gestión de la movilidad de los usuarios, gestión de las sesiones de datos o circuitos que transportan la información de los usuarios, mecanismos de interconexión con otras redes, posee equipos que albergan funciones de conmutación de circuitos, encaminamiento de paquetes (routing), bases de datos, etc

Otras Redes: Redes de cobertura amplia (WAN), con las cuales la red celular se conectara.

Para cada una de las arquitecturas a analizar se identificara cada parte como: las identidades funcionales, las interfaces entre ellas, los protocolos que emplean, la interfaz que se encuentra entre el móvil y la estación base y por último los servicios que ofrecen. [10]

1.4.1 ARQUITECTURA DE UNA RED GSM (2G)

Una red GSM (Global System for Mobile Communications) se encuentra formada por diferentes componentes que integran la Red Pública móvil Terrestre (Figura 1.7).

- Estación Móvil (MS)
- Sub Sistema Estación Base (BSS)
- Sub sistema de Red (NSS)
- Sub Sistema de Operación (OSS)

Cada subsistema está conformado por diferentes elementos de red que cumplen con diferentes funciones y estos a su vez se comunican con las distintas entidades a través de interfaces utilizando protocolos específicos. [11]

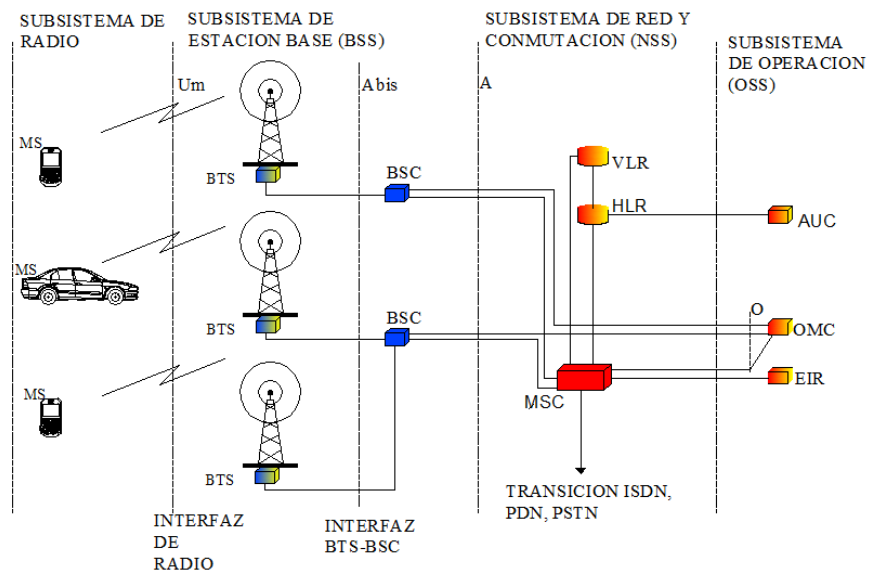


Figura 1. 7: Subsistemas de una Red GSM

Estación Móvil (MS): O equipo de Usuario,(Arquitectura Genérica de Un sistema Celular.).

La Unidad de Transcodificación (TRAU): Se encarga de comprimir la información en la interfaz aérea cuando se hace necesario, la TRAU es parte de la BSS, y permite que tasas de datos GSM(8,16,32 Kbps), puedan ser enviadas hacia la interfaz ISDN del MSC que solo acepta tasas de 64 Kbps.

Sub Sistema de Estación Base (BSS): Está compuesto de dos partes, (BTS y BSC)

La Estación Transceptora de Base (BTS): Se encarga de proporcionar vía radio la conectividad entre la red y las estaciones móviles.

Control de Estación Base (BSC): Se encarga de todas las funciones centrales y de control del subsistema de Estación Base. Generalmente maneja varias BTS's y Gestiona las interfaces de radio a través de ellas, así como el Handover.

Sub sistema de Red (NSS): Está compuesta de tres partes, MSC, VLR y HLR.

Home Location Register (HLR): Es una base de Datos que contiene y administra toda la información de cada suscriptor registrado en la red, así como la localización del abonado. Esta localización es necesaria para poder encaminar llamadas entrantes hacia el terminal, por medio del protocolo SS7.

Visitor Location Register (VLR): Está diseñado para no sobrecargar al HLR. Guarda temporalmente la misma información que el HLR cuando el abonado se encuentra en modo de intinerancia (Roaming).

Centro de Conmutación de Servicios Móviles (MSC): Se encarga de enrutar el tráfico de llamadas entrantes y salientes, y la asignación de canales de usuario en la interfaz entre el MSC y las BSC

Sub sistema de Operación: Está constituido por OMC,AuC y EIR

Centro de Operación y Mantenimiento (OMC): Monitorea y controla los otros elementos de red y garantiza la mejor calidad de servicio, las funciones de gestión de la OMC incluyen la administración de suscriptores y equipos, facturación y generación de datos estadísticos sobre el estado y la capacidad de utilización de los elementos de red

Centro de Autenticación (AuC): La AuC contiene toda la información necesaria para proteger la identidad del suscriptor, genera y almacena información relativa a la seguridad, genera las claves usadas para la autenticación y encriptación.

Registro de Identidad de Equipos (EIR): La EIR es una base de datos central en la que los abonados y el número de los equipos (IMEI) se almacenan, y está

conectado a través de una interfaz para los elementos de red NSS y el OSS. La base de datos contiene una lista blanca, una gris y una negra.

- La lista blanca contiene la lista de IMEI de estaciones de radio móviles válidos.
- La lista de negro contiene todos los IMEI de estaciones de radio móviles robados o suspendidos.
- La lista gris incluye una lista de IMEI de mal funcionamiento y equipos que no está recibiendo ningún servicio. [10]

5.1.3.1 Interfaces y Protocolos

Entre cada par de elementos de la arquitectura GSM, existe una interfaz, cada interfaz requiere de su propio conjunto de protocolos, manejar interfaces comunes garantiza la interoperabilidad entre equipos de distintos fabricantes, pudiendo interconectarlos sin problemas y permitiendo así el funcionamiento de terminales, la interfaz hace referencia al punto de contacto entre dos entidades adyacentes (equipo o sistema) y protocolo es el flujo de información a través de la interfaz.

Las interfaces entre sus diferentes elementos de una red GSM son:

- Interfaz de radio común, llamado interfaz de aire, esta es entre la MS y la BS
- Interfaz A entre el MSC el BSC
- Interfaz A bis entre la BTS y la BSC

Tabla 1. 1: Protocolos e interfaces en una arquitectura GSM, [10]

Interfaz	Situada entre	Descripción	Protocolo de Señalización
A	MSC-BSC	Permite el intercambio de información sobre la gestión del subsistema BSS, de las llamadas y la movilidad. A través de ella se negocian los circuitos que serán utilizados entre el BSS y el MSC	SS7
Abis	BSC-BTS	Permite el control del equipo de radio	LAP-D

B	VLR-MS asociados	VLR es la base de datos que contiene toda la información que permite ofrecer el servicio a los clientes que se encuentran en el área de influencia de sus MSC asociados. Por lo tanto, cuando un MSC necesite proporcionar información sobre un móvil acudirá a su VLR. Esta interfaz NO debe ser externa (por desempeño, por el volumen de información intercambiado).	MAP/B (2)
C	HLR-GMSC	Es la interfaz utilizada por los gateways GMSC para enrutar la llamada hacia el MSC destino. La GMSC no necesita contar con un VLR, se trata de un nodo que sólo transmite llamadas.	MAP/C
D	HLR-HLR	Permite intercambiar información entre ambas bases de datos, esta información se encuentra relacionada con la posición del móvil y la gestión del servicio contratado por el usuario.	MAP/D
E	MSC-MS	Permite intercambiar la información necesaria para iniciar y realizar un intercambio Inter-MS cuando el móvil cambia de área de influencia de un MSC a otro.	MAP/E, RDSI, ISUP(3)
F	MSC-EIR	Utilizada cuando el MSC desea comprobar el IMEI de un equipo.	
G	VLR-VLR	Utilizada para permitir la interconexión entre dos VLRs de diferentes MSCs	MAP/G
H	MSC-SMS- G		MAP/H
I	MSC-MS	Permite el intercambio transparente de datos entre el MSC y el MS a través del BSS	
Um	BSS-MS	Es la interfaz de radio, se encuentra entre la MS y la BSS	LAPDm

1.4.2 ARQUITECTURA DE UNA RED GSM/GPRS

La arquitectura de la Red GSM/GPRS, es una evolución de la red GSM a la cual se le considera como 2,5G y utiliza la infraestructura de GSM para permitir la transmisión de paquetes de datos a tasas entre 9,6 y 171 Kbps, pero aunque se intente utilizar la red GSM al máximo es necesario adicionar algunos elementos de red, enlaces y protocolos, para manejar este nuevo tipo de tráfico y construir una red móvil celular de paquetes.

Los elementos de red que se han incrementado se pueden observar en la Figura 1.8, y son:

- SGSN(Server GPRS Support Node – Nodo de Soporte de Servidor GPRS)
- GGSN(Gateway GPRS Support Node – Nodo de Soporte de Compuerta GPRS)
- GMSC(Gateway MSC, Compuerta de la Central de Conmutación Móvil). [10], [11]

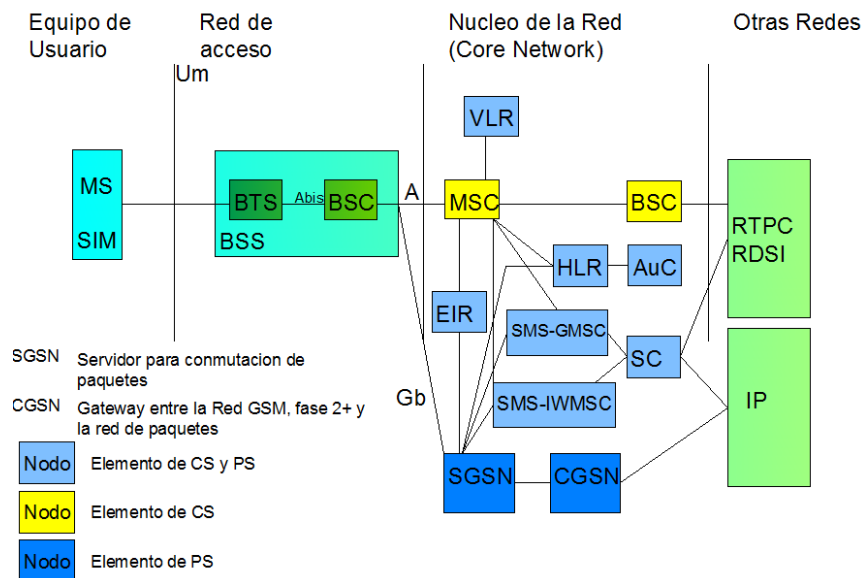


Figura 1. 8: Arquitectura de Red GSM/GPRS

Nodos de Soporte GPRS (GSN)

En este tipo de redes la estructura convencional de GSM se ha adicionado una nueva clase de nodos de red que permiten la transferencia y conmutación de paquetes de extremo a extremo, los GSN, los mismo que se encargan de la entrega y enrutamiento de paquetes de datos entre el móvil y las redes de datos públicas.

El SGSN (Servicing GSN): Se encargada de la transferencia de paquetes desde/hacia los móviles en su área de servicio, esta tarea incluye el enrutamiento de paquetes, su transferencia, la gestión de la movilidad y del enlace lógico y las funciones de autenticación y facturación. Al igual que en las redes GSM, toda la información del usuario que se debe conocer en el nodo SGSN, se almacena en el registro GR, que conceptualmente hace parte del registro HLR. El GR almacena el perfil del usuario, la dirección actual de SGSN y las direcciones del protocolo PDP (PDN Protocol) para cada usuario GPRS en la PLMN.

El SGSN es conectado al subsistema de estaciones base a través de una conexión Fram Relay a la PCU en la BSC.

El GGSN (Gateway GSN): Es el otro tipo de nodo de soporte a GPRS, que actua como interfaz lógico entre la red troncal GPRS y las redes PDN externas. Convierte los paquetes GPRS provenientes del SGSN al formato PDP apropiado (IP o X.25) en el otro sentido las direcciones del PDP de los paquetes de datos entrantes son convertidas a direcciones GSM de los destinatarios y luego los paquetes son enviados al correspondiente SGSN. Para este propósito, la GGSN almacena la dirección del nodo SGSN del usuario y su perfil, consultándolo en los registros HLR/GR. Uno o más GGSNs pueden ser provistos para soportar múltiples SGSNs.

GMSC (Compuerta Central de Conmutación Móvil): En el caso de llamadas entrantes a una PLMN, la llamada es encaminada hacia un MSC, si la red fija no es capaz de interrogar a un HLR. Este MSC interroga el HLR apropiado y entonces encamina la llamada al MSC donde esté la MS llamada. El MSC que realiza la función de encaminamiento hasta la ubicación de la MS se denomina GMSC.

En la red núcleo de la arquitectura de la red GSM/GPRS se debe distinguir tres tipos de elementos: los que soportan exclusivamente a los servicios de conmutación de circuitos (CS): el MSC y el GMSC, los que soportan exclusivamente a los

servicios de conmutación de paquetes (PS): El SGSN y el GGSN, y los que son utilizados para soportar los dos tipos de servicios (PS y CS): El VLR, el HLR, el AuC, El EIR. [10]

1.4.2.1 Interfaces y Protocolos

Tabla 1. 2: Protocolos e interfaces en una arquitectura GPRS. [10]

Interfaz	Situada Entre
Ga	Nodos GSN (GGSN,SGSN) y el Charging Gateway (CG)
Gb	SGSN-BSS(PCU) Normalmente en Frame Relay
Gc	GGSN-HLR
Gi	GGSN y una red externa de datos (PDN)
Gn	GSN-GSN, conexión Intra-PLMN network backbone
Gp	GSN-GSN, conexión Inter-PLMN network backbone
Gr	SGSN-HLR
Gs	SGSN-MSC/VLR
Gf	SGSN-EIR

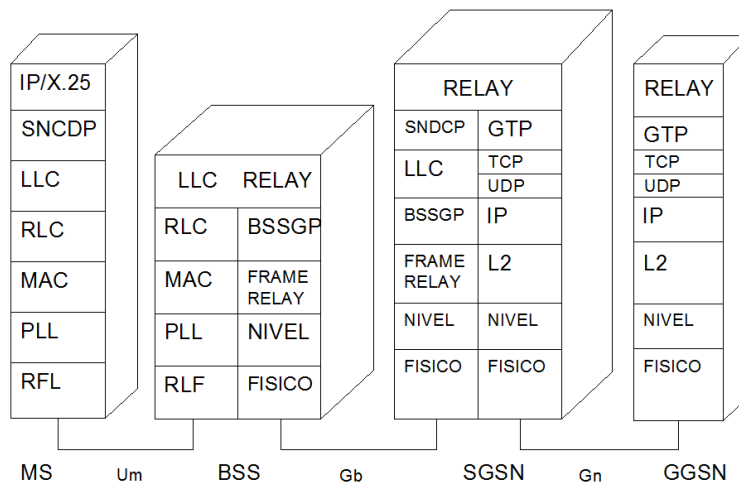


Figura 1. 9: Pila de Protocolos GPRS

El protocolo entre SGSN y GGSN a través de la interfaz Gn es GTP, es un protocolo tunneling de nivel 3, aunque en la figura se define la interfaz Gn (y la Gi no mostrada) como IP, los protocolos subyacentes no son especificados para proveer flexibilidad. [10]

Con el medio físico empleado, la interfaz más común mente utilizada con GPRS es Fast Ethernet. Para la interfaz Gi las más comunes son interfaz Serial, E1/T1 o Ethernet. Las interfaces WAN físicas pueden soportar un amplio rango de protocolos, como Frame relay, HDCL y RDSI.

Entre SGSN y el MS, el protocolo es SNDCP, traza las características de nivel de red en el nivel subyacente de control de enlace lógico proporcionando la multiplexación de múltiples mensajes de nivel de red en una única conexión de enlace lógico virtual. Este protocolo se encarga de las funciones de segmentación, cifrado y compresión.

Entre el BSS y el SGSN el protocolo utilizado es BSSGP, el cual transporta información relacionada con enrutamiento y la QoS y opera sobre Frame Relay.

1.4.3 ARQUITECTURA DE UNA RED UMTS (3G)

La arquitectura de red UMTS es una evolución sobre la Red GPRS, UMTS se compone de dos grandes subredes:

- La red de telecomunicaciones
- La red de gestión.

La red de telecomunicaciones es la encargada de sustentar la transmisión de información entre los extremos de una conexión.

La red de gestión se encarga de la provisión de medios para la facturación y tarificación de los abonados, el registro y definición de los perfiles de servicio, la gestión y seguridad en el manejo de datos, la operación de los elementos de la red asegurando el correcto funcionamiento, y la detección y resolución de averías o anomalías. También permite la recuperación del funcionamiento tras periodos de apagado o desconexión de algunos de sus elementos. [10], [11]

A continuación se puede observar en la Figura 1.10 los elementos que componen una red UMTS

Núcleo de red (Core Network - CN): Incorpora funciones de transporte y de inteligencia. Las primeras soportan el transporte de la información de tráfico y señalización, incluida la conmutación. El encaminamiento reside en las funciones de inteligencia, que comprenden prestaciones como la lógica y el control de ciertos servicios ofrecidos a través de una serie de interfaces bien definidas; también incluyen la gestión de la movilidad.

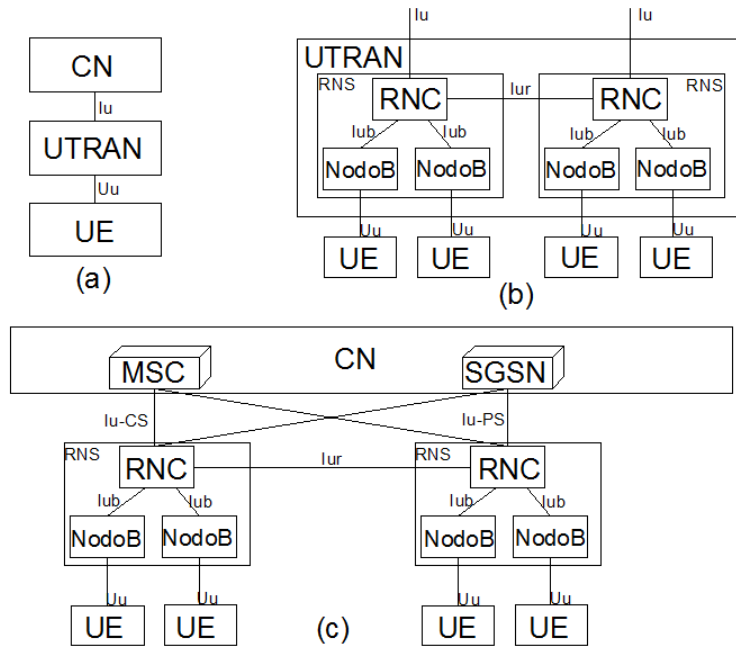


Figura 1. 10: Arquitectura de Red UTMMS

A través del núcleo de red, UMTS se conecta con otras redes de telecomunicaciones, de forma que resulte posible la comunicación no sólo entre usuarios móviles UMTS, sino también con los que se encuentran conectados a otras redes.

Red de acceso radio (UTRAN): Desarrollada para obtener altas velocidades de transmisión, la red de acceso radio proporciona la conexión entre los terminales móviles y el Core Network. En UMTS recibe el nombre de UTRAN y se compone de una serie RNS que son el método de comunicación de la red UMTS. Un RNS es responsable de los recursos y de la transmisión/recepción en un conjunto de celdas y está compuesto de un RNC y uno o varios nodos B.

Nodo B: Es la unidad de transmisión/recepción que permite la comunicación entre las radio celdas, se encuentra en donde existe una BTS GSM para reducir los costos de implementación. Convierte unidades de datos en la interfaz de radio Uu. Incluye corrección de errores, adaptación a la tasa de datos en la interfaz de radio, monitoreo de calidad, la potencia de la conexión y el cálculo de la tasa de errores. Se conecta con el equipo del usuario a través de la interfaz de radio Uu, utilizando WCDMA. La interfaz Iub provee la conexión entre el nodo B y el RNC usando ATM.

RNC (Radio Network Controller): Este componente realiza funciones que son equivalentes a las efectuadas por el BSC en las redes GSM/GPRS. El RNC provee control centralizado de los nodos B en su área de cobertura, maneja los intercambios de protocolos en las diferentes interfaces del UTRAN (Iu,Iur y Iub), además se encarga de la multiplexación de la información proveniente de los dominios de paquetes y de circuitos desde las interfaces IuPS y Iu-CS, para que puedan ser transmitidas sobre las interfaces Iu, Iub y Uu, hacia y desde el equipo de usuario. Además se encarga del control de recursos de radio, el control de la admisión, asignación de canal, control de handover, segmentación y reensamble, señalización de broadcast y el control de potencia.

UE (User Equipment): Se compone del terminal móvil y su módulo de identidad de servicios de usuario/suscriptor (USIM) equivalente a la tarjeta SIM del teléfono móvil. Los terminales móviles de tercera generación ya no deben ser sencillos como los de segunda generación y 2.5 G, sino deben ser dispositivos avanzados que permitan el intercambio de diferentes tipos de información, por lo tanto deben proveer funciones de seguridad y autenticación del usuario, deben ser equipos multifuncionales para permitir el acceso GSM/GPRS/UMTS. [10]

1.2.3.1 Interfaces y Protocolos

La arquitectura de una red UMTS define nuevas interfaces, estas se pueden observar en la tabla 1.3.

Tabla 1. 3: Protocolos e interfaces en una arquitectura UMTS. [10]

Interfaz		Situada Entre
Uu		Equipo de Usuario (UE) y Nodo B
Iu	Iu-CS	Interfaz para conmutacion de Circuitos (RNC-MSC/VLR)
	Iu-PS	Interfaz para Conmutación de Paquetes (RNC-SGSN)
Iub		RNC a Nodo B
Iur		RNC a RNC (No tiene equivalencia en GSM)

1.4.4 ARQUITECTURA DE UNA RED LTE (4G)

En la red de cuarta generación, se pueden identificar tres elementos principales que constituyen la arquitectura de un sistema celular LTE.

- Equipo de Usuario
- Red de Acceso
- Red Troncal

Equipo de Usuario: Dispositivo que permite al usuario acceder a los servicios que nos ofrece la red. Consta de la tarjeta SIM, que contendrá información necesaria para poder conectarse a la red a través de la interfaz radio.

Red de Acceso: Es la parte del sistema que realiza la comunicación, transmisión radio, con los equipos de usuario que proporciona la conectividad con la red troncal.

Gestiona los recursos de radio que estén disponibles para ofrecer los servicios portadores de una manera eficiente. Está formada por la estación base y dependiendo de la generación por equipos controladores de estación base.

Red Troncal: Parte del sistema que se encarga del control de acceso a la red celular, autenticación de los usuarios, gestión de la movilidad de los usuarios, gestión de la interconexión con otras redes, control y señalización asociada al servicio de telefonía. Los equipos que conforman la red troncal albergan funciones de conmutación de circuitos, routing, base de datos. [12]

En las especificaciones se denomina a la arquitectura del sistema LTE como EPS, que consiste dividir el sistema en los tres elementos mencionados anteriormente. Un equipo de usuario, una nueva red de acceso que denominaremos E-UTRAN y una red troncal que denominaremos EPC. Todos los componentes que engloban este sistema están diseñados para soportar todo tipo de servicios de telecomunicación mediante mecanismos de conmutación de paquetes, por lo que no es necesario disponer de un dispositivo que trabaje en modo circuito, ya que en el sistema LTE los servicios con restricciones de tiempo real se soportan también mediante conmutación de paquetes. En la Figura 1.12, vemos un ejemplo de la distribución de la arquitectura del sistema LTE.

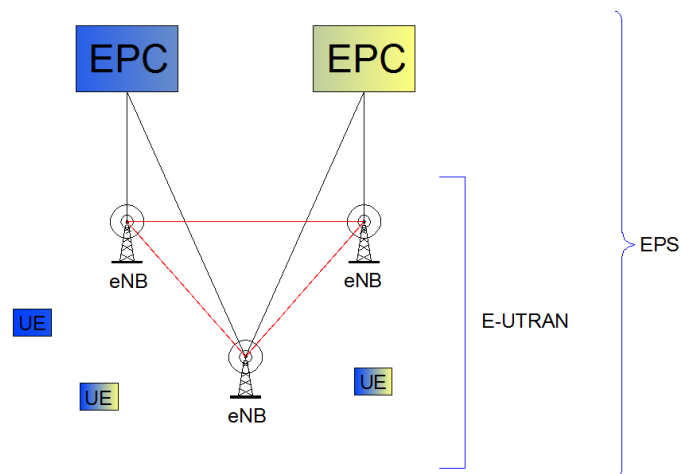


Figura 1. 11: Arquitectura simplificada LTE

Red Troncal (EPC- Evolved Packet Core): La arquitectura EPC se guía por el principio de separación lógica de la señalización y las redes de transporte de datos, está formada principalmente por las siguientes entidades:

Mobile Management Entity (MME): Es el principal elemento que maneja el plano de control en el EPC. Proporciona gestión de movilidad y la administración de sesiones se realiza en el MME.

System Architecture Evolution Gateway (S-GW): Es el nodo del plano de usuario que une la red de acceso con el núcleo de la red. Actúa como un asegurador de movilidad local cuando existe handover entre eNBs y como un asegurador de movilidad entre LTE y otras tecnologías 3GPP. [12]

Packet Data Network Gateway (P-GW o PDN-GW): El punto de interconexión a redes IP externas

Policy and Charging Rules Function (PCRF): Es el elemento de la red responsable de la política y control de carga. Gestiona y provisiona los servicios en términos de QoS y tarificación aplicadas al tráfico de usuario.

Evolved Packet Data Gateway (ePDG): Establece un túnel seguro para la transmisión de datos con el terminal.

cobertura R . Este mismo canal puede ser usado en otra celda con el mismo radio de cobertura a una distancia D de separación (Figura 1. 13). [13]

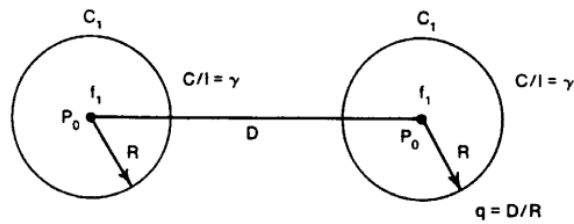


Figura 1. 13: Relación D/R

1.5.1 REUSO DE FRECUENCIAS

Por lo anteriormente expuesto, el concepto de re-uso de frecuencias se refiere al uso de las mismas frecuencias portadoras para cubrir distintas áreas separadas por una distancia suficientemente grande para evitar interferencia co-canal.

En lugar de cubrir un área desde un único sitio de transmisión con alta potencia y alta elevación, el proveedor de servicios puede subdividir el área en sub-áreas, zonas o celdas en donde cada una posee un transmisor de menor potencia.

Las celdas con distintas letras van a ser servidas por un juego de frecuencias diferentes. Así celdas que estén suficientemente apartadas ($A1$ y $A2$) pueden usar el mismo juego de frecuencias (Figura 1. 14), de esta manera, el sistema móvil basado en el concepto de celular puede atender simultáneamente una cantidad mayor de llamadas que el número total de canales asignados. [13]

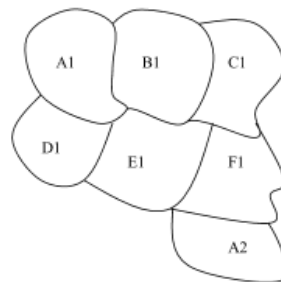


Figura 1. 14: Celdas amorfas

Si a cada celda se le asigna un grupo de canales K ($K < S$), y si los S canales se dividen entre N celdas en grupos de canales únicos y disjuntos, el número total de canales de radio disponibles se puede expresar de la siguiente manera:

$$S = K N \quad (1.1)$$

Donde:

K= número de canales por celda

N= número de celdas

CLUSTER

Las N celdas que utilizan el conjunto completo de frecuencias disponibles, se denomina cluster (conjunto de celdas para un sistema móvil). [3], [13]

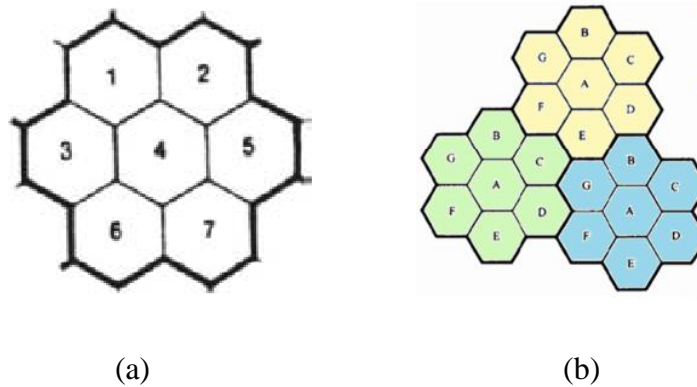


Figura 1. 15: (a), Celdas formando un Cluster, (b), varios Cluster cubriendo una area

Si un cluster se repite M veces dentro del sistema, el número total de canales dúplex C se puede utilizar como una medida de la capacidad y se lo puede expresar como:

$$C= MKN=MS \quad (1.2)$$

La capacidad de un sistema celular es directamente proporcional al número de veces que se replica un cluster en un área de servicio fijo.

El factor N es el tamaño del cluster y generalmente los valores que se utilizan son 4,7 o 12, el factor de reuso de frecuencia de un sistema celular está dado por la relación $1/N$, ya que a cada celda perteneciente al cluster solo se le asigna $1/N$ de los canales totales disponibles del sistema.

Debido a la geometría hexagonal de las celdas, cada una tiene 6 vecinos equidistantes que están separados cada uno por múltiplos de 60° , y el número de celdas por cluster N, solo puede tomar valores que cumplan la ecuación:

$$N = i^2 + ij + j^2 \quad (1.3)$$

Donde i y j son números enteros no negativos, para encontrar el co-canal vecino más próximo de una celda, se debe tener en cuenta lo siguiente:

Se debe tomar una celda como referencia y desplazarse i celdas a lo largo de toda la cadena del hexágono, a continuación se debe girar 60° en sentido anti horario y se desplaza j celdas más. La celda de referencia y esta última son co-canal.

Por ejemplo se considera $i=3$ y $j=2$, que cumpliendo la condición de la ecuación nos da un valor de $N=19$, en este caso la celda de referencia A al igual que las localizadas según lo analizando anteriormente serán con-canal. [3], [13]

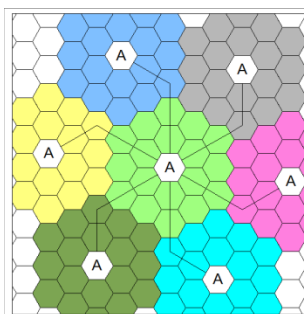


Figura 1. 16: Desplazamiento para ubicar celda co-canal.

Celda co-Canal: Se denomina a las celdas dentro de un área de cobertura que utilizan las mismas frecuencias.

Interferencia co-Canal: Es la interferencia de la señal que existe entre cada una de las celdas co-Canales. Para reducir la interferencia co-Canal, las celdas co-canales deben estar separadas una distancia lo suficiente para que la señal se atenúe debido a la propagación. [3], [13]

1.5.2 RELACIÓN C/I Y FACTOR REDUCCIÓN – INTERFERENCIA

La selección de una celda adecuada, involucra considerar el radio de la celda y la distancia de reúso de frecuencia.

Mientras menor sea el número de celdas por clúster, mayor será el número de canales de radio frecuencia. Por lo que es necesario buscar una alternativa para el uso

eficiente del espectro, ya que tiene que existir un equilibrio entre el número de celdas por cluster y una calidad de transmisión alcanzable. [3]

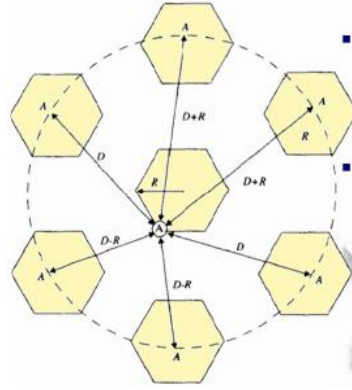


Figura 1. 17: Móvil al borde de una celda

Cuando un usuario se encuentra al límite de la celda, como lo muestra la figura 1.17, va a tener una mayor interferencia co-canal, ya que la distancia entre el móvil A y la celda interferente co-canal es menor, teniendo una distancia D-R, y la distancia del móvil A con la celda interferente más lejana es D+R, dando una relación señal interferencia en el peor de los casos:

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-4}}{2(D-R)^{-4} + 2(D+R)^{-4} + 2D^{-4}} \quad (1.4)$$

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{2(Q-1)^{-4} + 2(Q+1)^{-4} + 2Q^{-4}} \quad (1.5)$$

Donde:

Q → factor de reducción de interferencia

$$Q = \frac{D}{R} = \sqrt{3N} \quad (1.6)$$

Cuando el valor de Q es mayor, la calidad en la transmisión aumenta e indica una interferencia co-canal reducida.

Tabla 1. 4: Valores adecuados para el tamaño de un cluster.

	N	Q
i=1 , j=1	3	3
i=1 , j=2	7	4,58
i=2 , j=2	12	6

1.5.3 DIVISIÓN DE CELDAS (MICRO CELDAS)

Una micro celda es el proceso de subdividir una celda congestionada en celdas más pequeñas, cada una con su propia estación base y considerando que se debe reducir la altura de la antena así como la potencia del transmisor (Figura 1.18).

La estación base reducida en tamaño y potencia se coloca en las esquinas de las nuevas celdas. [3]

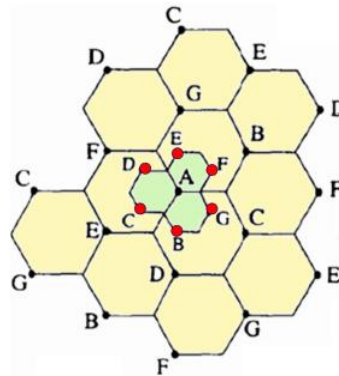


Figura 1. 18: División de una celda

La potencia transmitida P_{t1} para la nueva celda más pequeña, puede ser determinada a partir de la potencia de transmisión de la antigua celda grande P_{t0} .

Si suponemos que la potencia recibida en el límite de la celda es P_r , se tiene la siguiente ecuación (donde α es una constante).

$$P_r = \alpha P_{t0} R_0^{-\gamma} \quad (1.7)$$

$$P_r = \alpha P_{t1} (R_1)^{-\gamma} \quad (1.8)$$

Las ecuaciones descritas anteriormente representan la potencia recibida en el límite de la antigua celda como de la nueva celda de radio $R_1 = R_0/2$ respectivamente, y para establecer la potencia recibida P_r idéntica en el límite de las dos celdas de diferente tamaño igualamos las ecuaciones y obtendremos: [3]

$$P_{t1} = P_{t0} \left(\frac{1}{2}\right)^{-\gamma} \quad (1.9)$$

Para un ambiente radio móvil típico se considera un valor de $\gamma = 4$ y procedemos a calcular el valor de la potencia:

$$P_{t1} = P_{t0} \left(\frac{1}{2}\right)^{-4} \quad (1.10)$$

$$P_{t1} = P_{t0}/16 \text{ o expresada en dB } P_{t0} = P_{t0} - 12dB \quad (1.11)$$

El valor de la potencia transmitida debe reducirse en 12 dB al valor de la potencia antigua o de la celda original. El valor del factor de reducción de interferencia co-canal Q1, después de la división de la celda, se mantiene igual que el valor de Q0 en la celda original, dado que D y R se han reducido a la mitad.

La fórmula general para una celda que se obtuvo luego de n divisiones y cada vez el nuevo radio es la mitad del anterior se expresa de la siguiente manera:

$$R_n = R_0/2^n \quad (1.12)$$

$$P_{tn} = P_{t0} - n \cdot 12dB \quad (1.13)$$

A medida que se vaya sub dividiendo cada celda en más sub celdas la formula general puede expresarse como:

$$\text{Nueva_Capacidad} = (4)^n \times (\text{Capacidad_original}) \quad (1.14)$$

Donde n es el numero de veces que se divide la celda.

Ahora las ventaja que nos permite la división de celdas es el poder manejar un mayor volumen de trafico, pero al incrementarse el número de celdas es necesario la instalación de nuevas estaciones base, que incluyen un costo económico y al reducir el tamaño de las celdas se incrementa la cantidad de handoffs. [3]

1.5.3.1 SECTORIZACION

La técnica para lograr una reducción de la interferencia co-canal e incrementar la capacidad del sistema, es usando antenas direccionales, al usar antenas direccionales, es posible dividir a la celda en tres sectores de 120° o en 6 sectores de 60°. [3]

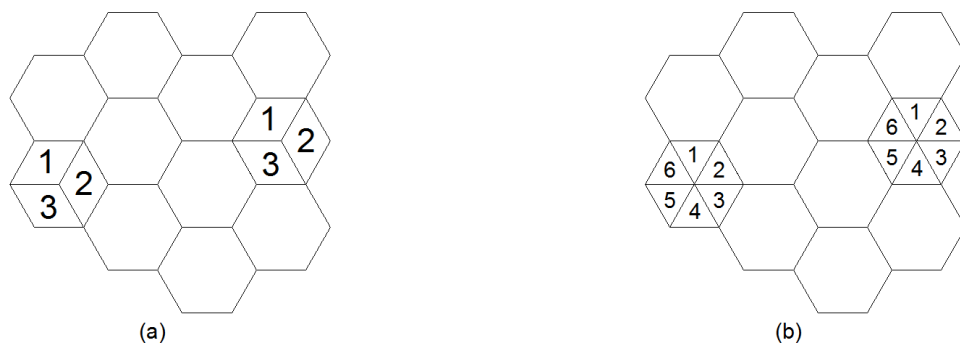


Figura 1. 19: Sectorización de una celda, en: (a) 3 sectores, (b) 6 sectores.

Como se puede apreciar, en la figura, al tener una sectorización en pasos de 120° , se reduce la interferencia de las celdas co-canales, de las 6 celdas que pueden tener interferencia co-canal con una antena omnidireccional, solo 2 quedarían con posible interferencia co-canal.

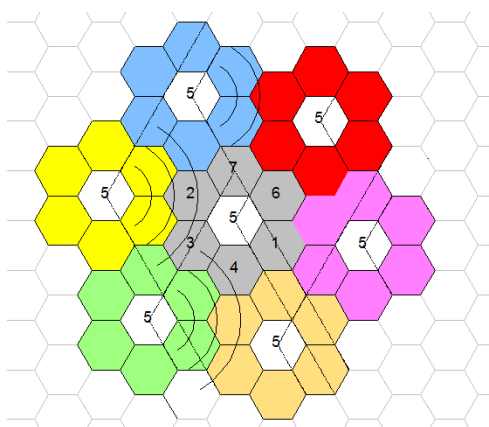


Figura 1. 20: Sectorización de celdas

1.5.4 TRUNKING Y GRADO DE SERVICIO

Los Sistemas celulares de radio se basan en enlaces troncales para poder brindar el servicio a un gran número de usuarios en un espectro limitado de radio.

En un sistema de enlaces de Radio, a cada usuario se le asigna un canal por llamada y terminación de llamada, el canal ocupado previamente se libera y se devuelve inmediatamente al grupo de canales disponibles

Los fundamentos de la teoría de trunking fueron desarrollados por Erlang. Un Erlang representa la cantidad de intensidad de tráfico transportado por un canal que está completamente ocupado (es decir, una llamada-hora por hora o una llamada-

minuto por minuto). Por ejemplo, un canal de radio que está ocupado durante treinta minutos el tráfico transportado en una hora sería de 0,5 Erlangs.

El grado de servicio (GOS), es una medida de la capacidad de un usuario para acceder a un sistema de concentración de enlaces durante la hora más cargada u hora pico. Se expresa típicamente como la probabilidad de que una llamada sea bloqueada o la probabilidad de que una llamada experimente un retraso mayor que un cierto tiempo de puesta en cola. [3]

1.5.4.1 TRAFICO

La intensidad del tráfico ofrecido por cada usuario es igual a la tasa de solicitud de llamada multiplicada por el tiempo de retención. Cada usuario genera una intensidad de tráfico A_u en Erlangs dado por:

$$A_u = \lambda \cdot H \quad (1.15)$$

Para un sistema que contiene U número de usuarios y un número indeterminado de canales, la intensidad de tráfico ofrecido total es

$$A = U \cdot A_u \quad (1.16)$$

En un sistema Troncal un canal C , si el tráfico se distribuye por igual entre los canales, la intensidad de tráfico por canal es:

$$A_c = U \cdot A_u / C \quad (1.17)$$

El tráfico ofrecido no es solo el tráfico cursado por el sistema troncal, ya que existe tráfico que se pierde (llamadas no cursadas).

Por ejemplo, el sistema celular AMPS está diseñado para una GoS de 2% de bloqueo. Eso implica que 2 de cada 100 llamadas quedan bloqueados debido a la ocupación del canal durante la hora de mayor actividad (hora pico). [3]

CAPÍTULO 2.

2. SISTEMAS FEMTOCELDA

La continua evolución de las tecnologías celulares, han permitido brindar más servicios a los usuarios, y por ende la popularidad del teléfono móvil ha incrementado en el transcurso del tiempo. Los servicios brindados por las operadoras móviles, requieren cada vez un mayor ancho de banda, por lo que este ha llegado a un punto de saturación, y adoptar una nueva forma de brindar los mismos servicios, con un ancho de banda limitado, es una necesidad urgente.

La tecnología más usada en la actualidad, 3G, ofrece un mala cobertura en interiores, donde análisis estadísticos han demostrado que el 50% de las llamadas y el 70% de la transmisión de datos realizados desde un teléfono móvil son hechas desde un ambiente indoor. Esta mala cobertura es debido a que la frecuencia que utiliza esta tecnología es elevada, y al momento de dar cobertura en ambientes interiores, la penetración a través de muros es cada vez menor, disminuyendo la calidad en los servicios de voz y video, y haciendo un sistema lento durante la transmisión de datos, dando como consecuencia una inconformidad por parte de los usuarios. Esta inconformidad lleva a buscar nuevas operadoras, con el fin de obtener mejores beneficios y por ende llevando a tener pérdidas para la operadora, tanto por los ingresos que dejan de tener como por los costos que involucra capturar nuevos clientes.

Para mantener a sus clientes satisfechos las operadoras móviles deben de buscar alternativas viables las cuales permitan aumentar la cobertura y aumentar la capacidad. Una gran alternativa es instalar nuevas BS, pero esta solución es costosa, por razones como: adquisición de emplazamientos, oposición de los propietarios vecinos por temor a radiaciones.

Nace una solución que puede lograr aumentar la capacidad y la cobertura de un operador móvil, evitando los inconvenientes antes mencionados, a esta solución se le da el nombre de FEMTOCELDA.

2.1 ESTADO DEL ARTE

En 1999, en los laboratorios de Alcatel Lucent, nace un concepto “Estación Base Domestica”, pero no fue sino hasta que en el año 2005, este término empieza a tener popularidad y, en el año 2006 se lo adopta con el nombre de “FEMTOCELDA”. [14]

En el año 2007 se funda el Femto Forum en Barcelona, con el propósito de estandarizar las femtoceldas y el análisis de un despliegue a nivel mundial, a lo cual se unen cerca de 100 empresas de telecomunicaciones ofertando hardware y software. [15]

Normalmente a una Femtocelda se lo ve como un punto de acceso WIFI, pero es conocido como FAP, con la diferencia de que una Femtocelda contiene RNC o BSC en el caso de GSM, [15], cumpliendo las mismas funciones de una típica BS.

El área que cubre la femtocelda, femtozona, debe de estar en la capacidad de brindar servicios en HD, para esto el ISP debe brindar un buen QoS. [16]

En algunos países desarrollados, como es el caso de España, esta tecnología se encuentra desarrollada desde hace pocos años, es el caso de la empresa Vodafone que se convirtió en la primera operadora en el año 2010 en comercializar femtoceldas. Esta compañía ya las comercializo en otros países tal es el caso del Reino Unido, las cuales utilizaban femtoceldas fabricadas por Alcatel Lucent y Sagem, y las que son utilizadas en España son Huawei, a una mensualidad de 15€. [17]

El país pionero en el despliegue de las femtoceldas en Latinoamérica es Brasil bajo la compañía TIM, misma que firmó un acuerdo con la empresa francesa Alcatel Lucent. El despliegue esta pronosticado para entrar en funcionamiento una vez finalizado el mundial del año 2014. TIM integrará femtoceldas a su red 3G, la cual concentra su mayor base de usuarios. Durante un período de tres años, para apoyar en la entrega de una solución rentable para mejorar la cobertura y la capacidad para sus suscriptores. [18], [19].

Las femtoceldas en la actualidad se acoplan al mercado de mayor usuarios, actualmente la tecnología 3G es la que predomina, por lo que tiene una tendencia a abarcar a los usuarios al implementación y uso de LTE.

El concepto de las femtoceldas se ha desarrollado con el fin de ayudar a la liberación del tráfico que ocasionan los usuarios de las macroceldas, por lo que se espera que su desarrollo llegue a evitar la necesidad de implementar macroceldas, que a la vez resulta difícil por situaciones geográficas o costos; y peor aún en zonas urbanas donde es netamente poblado.

2.2 DEFINICIÓN DE FEMTOCELDA

Las femtoceldas, son puntos de acceso de redes celulares, que conectan los móviles celulares con los operadores mediante el uso de DSL residencial, fibra óptica, o redes inalámbricas de última milla. Figura 2.1.

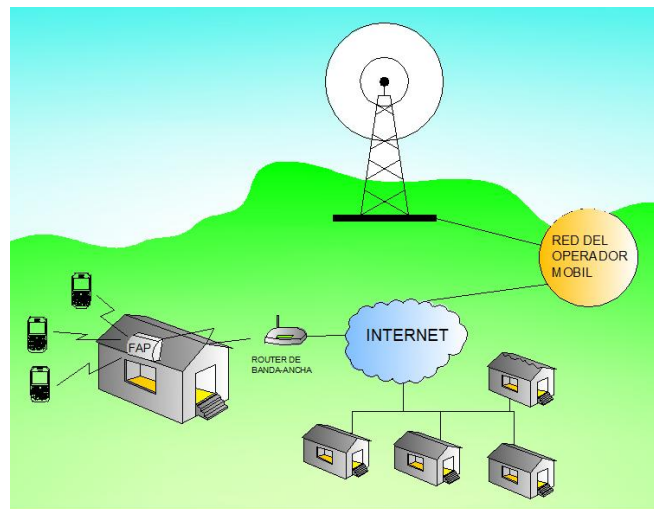


Figura 2. 1: Conexión de una Femtocelda con una operadora.

Se espera que el uso de las femtoceldas tengan gran acogida, que de cierta manera tiene grandes razones para que esto se dé, como:

- Proveer cobertura en lugares que no llega cobertura de una macro celda.
- Puede disminuir el tráfico de una macro celda, mejorando la capacidad y la calidad de la misma.

- El uso de femtoceldas se lo puede considerar más verde, hablando ecológicamente, frente al uso de las macro celdas, ya que funcionarían solamente cuando haya personas dentro del área de cobertura de la femtoceldas, de manera que puede traer consigo un ahorro de energía.

2.2.1 ARQUITECTURA DE UNA FEMTOCELDA

Una red basada en femtoceldas, envía el tráfico de una red celular por una red de bajo costo como es el uso de internet, para lograr esto es indispensable tomar en cuenta una estandarización que permita la integración de femtoceldas en las redes de servicio móvil.

2.2.1.1 CONECTIVIDAD FEMTOCELDA-NUCLEO DE RED, BASADAS EN Iuh

La Figura 2.2, muestra dos opciones para proveer cobertura en áreas pequeñas, la primera es con NodeB a pequeña escala misma que se reporta a una convencional RNC, en cambio teniendo un Home NodeB la cual tiene un RNC incorporado a ella, conectándose a la CN con muchos otros HNB's a través de un Gateway.

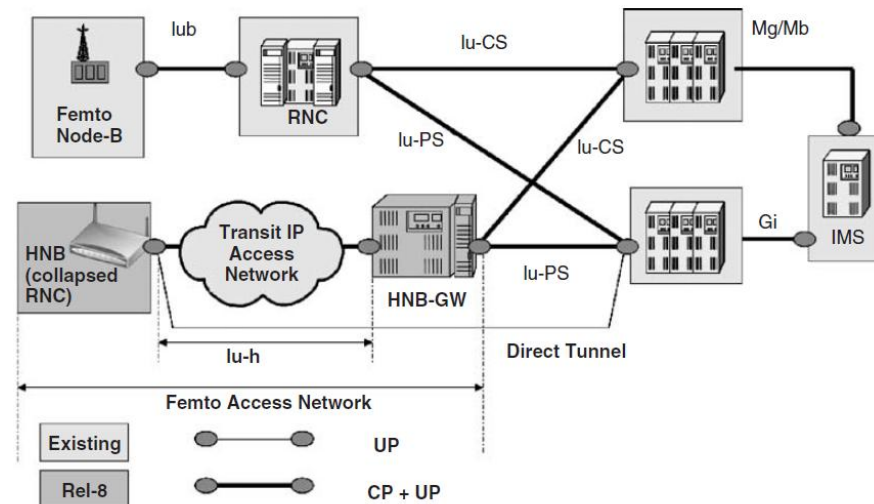


Figura 2. 2 Arquitectura de un acceso de red HNB

- **Red de Acceso HNB:** El acceso completo a la red consiste en formar parte de $N \times \text{HNB}$ y $M \times \text{HNB-GW}$ y debe proporcionar lo siguiente:

- a) Similares mensajes NAS de procedimientos entre UE y CN, como en una red macro.
 - b) Similares tipos de servicios como la red macro.
 - c) Similares técnicas de seguridad establecidas en una red macro, UEA, UIA.
 - d) Soporte de túnel directo entre HNB y el GGSN.
- **HNB:** El HNB tiene parámetros de RF y el rendimiento según HNB tiene parte o la totalidad de la funcionalidad normalmente asociado con un RNC. El HNB se ve como la ejecución de un estándar Uu hacia UE's UMTS existentes y una interfaz hacia HNB Gateway designado, Iu-h.
 - **HNB Gateway:** Designado como un elemento de red que se conecta con muchos HNBs sobre un Iu-h y presentado sobre un estándar Iu , soportando las siguientes funcionalidades:
 - a) Proporciona un mecanismo para apoyar otras funciones mejoradas para el acceso a la red-HNB.
 - b) Funciona en ambos sentidos de seguridad, autenticación y certificación.
 - **Iu-h:** Se encuentra entre el HNB y el HNB Gateway, de tal forma que trata de estandarizar características comunes de una red de acceso HNB. Los principios para considerarse un estándar son:
 - a) Iu-h sería transportada a través de IPv4 y con opción a IPv6.
 - b) Iu-h debe permitir habilitar todo el transporte de toda la información necesaria para soportar el acceso a la red HNB en funcionamiento y la interconexión con un CN tradicional
 - c) Se asume, además, que SCTP o TCP se adoptaría para la mensajería de señalización y control entre el HNB y el gateway
 - d) Para la protección del Iu-h, esta debe de ser encriptada.
 - e) Iu-h debe comprobar la integridad entre el HNB y el HNBGW. [15]

2.3 ASPECTOS TECNICOS DE LAS FEMTOCELDA

Mejorar la calidad del servicio brindado por parte del operador móvil, hacia el usuario, será siempre una prioridad, por muchas razones, entre las cuales puede destacar el de evitar un posible churn rate, pero al querer mejorar la calidad del

servicio brindado, compromete la capacidad de la operadora. La implementación de FEMTOCELDAS conlleva a mejorar la calidad brindada al usuario, dando como un valor agregado el incremento de la capacidad.

Cuando un usuario que tiene cobertura de una macrocelda, al ingresar dentro del área de cobertura brindada por una femtocelda, el tráfico que estaba ocupando en la macrocelda pasa a quedar libre aumentando la capacidad en la macrocelda.

El uso o implementación va enfocado a lugares donde hay demasiada demanda o lugares donde la señal ofrecida por una macrocelda es poca o en su defecto nula. Para la implementación de un sistema femtocelda es necesario una conexión a internet, ya que es la conexión a internet por donde la femtocelda va a tener acceso a la macrocelda.

Este tipo de sistema, se lo puede tomar con un sistema amigable con el medio ambiente, ya que utiliza un principal recurso, el mismo que ya está siendo implementados y usado, como es el uso del internet. Se lo puede llamar sistema amigable, ya que si no se utilizaría este sistema, para aumentar la capacidad de un operador móvil se tendría que buscar donde colocar nuevas torres las mismas que van a permitir poner antenas para la transmisión y estas torres necesitarían un espacio en el medio ambiente, por lo que habría impacto en el medio ambiente.

2.4 GESTION DE INTERFERENCIAS

2.4.1 ESTANDARIZACION POR EL 3GPP

La tecnología de femtoceldas comenzó a tener un auge entre los años 2007 y 2008, despertando el interés entre fabricantes y operadores móviles. Debido a la mejora de la capacidad, la calidad de los servicios ofrecidos y un aumento en la eficiencia espectral. Por otra parte así como existen múltiples ventajas de la implementación de femtoceldas también existen los problemas que se presentan, entre los cuales está la interferencia ya que las femtoceldas deben convivir con un sin número de dispositivos wi-fi, con macroceldas y con otras femtoceldas, por lo que el manejo de las interferencias es un aspecto crucial para el correcto funcionamiento.

Al tratarse de una nueva tecnología es necesario buscar una estandarización para solventar los siguientes problemas radio eléctrico:

- Manejo de Interferencias. Al convivir con diferentes dispositivos, así como con macro y otras femtoceldas
- Aspectos Regulatorios. Al tratarse de una pequeña estación base, la misma que transmite en el espectro asignado a cada operador. Por lo que debe cumplir con las leyes de regulación de cada país
- Instalación. Cada usuario es el encargado de instalar las femtoceldas, situándolos en cualquier lugar y teniendo la posibilidad de cambiar su ubicación con el tiempo sin que afecte las prestaciones del servicio. [15]

CONFIGURACIONES

Para implementar un sistema femtoceldas (Home NodeB) hay que tener en cuenta los diferentes tipos de configuración que existen, a continuación se presentan las diferentes propiedades que definen a cada configuración:

a) Acceso abierto o grupo cerrado

La configuración de acceso abierto o cerrado es la manera de comportarse de la femtocelda ya sea como pública o privada. Para escenarios con acceso abierto, el HNB ofrece servicio a cualquier equipo dentro de su área de cobertura, sin excepciones, mientras la configuración de acceso cerrado, brinda los servicios a un limitado número de usuarios pertenecientes a un grupo determinado.

b) Canal dedicado o Canal compartido

El punto de acceso femtocelda puede operar ya sea en un canal separado o canal compartido con el resto de la red móvil cercana.

c) Potencia máxima de transmisión fija o adaptativa

Las femtoceldas pueden tener su potencia máxima de transmisión fija, pero debido a la interferencia que se puede presentar por las otras redes existentes, es necesario utilizar un control adaptativo de potencia que permita ajustar su potencia de transmisión para minimizar los efectos de las otras redes cercanas.

Según las propiedades consideradas anteriormente 3GPP establece las siguientes configuraciones para una red de femtoceldas:

d) Configuración A. Grupo cerrado, canal dedicado, potencia de transmisión fija.

La configuración A, se caracteriza por un acceso controlado al HNB, mediante un acuerdo o negociación entre el HNB y el operador de la red. El acceso a la femtocelda se encuentra limitado a un cierto número de usuarios

El canal que ocupe la femtocelda no está compartido con la macro celda del operador, en el peor de los casos el canal asignado al HNB es uno adyacente al utilizado por el operador. La potencia se encuentra fijada por el operador de manera óptima para reducir las interferencias entre la macrocelda y el HNB.

e) Configuración B. Grupo cerrado, canal dedicado, potencia de transmisión adaptativa.

La configuración B al igual que la A, el acceso es limitado para un cierto número de usuarios y el canal utilizado es dedicado. Pero en cuanto a la potencia de transmisión de la femtocelda está ya no es fija, sino adaptativa, permitiendo variar la radiación emitida con el fin de reducir las interferencias con los diferentes sistemas adyacentes. La potencia estará acotada entre un límite fijo de potencia máxima y mínima.

f) Configuración C. Grupo cerrado, canal compartido, potencia de transmisión adaptativa.

Esta configuración mantiene el acceso restringido solo para un determinado número de usuarios. El canal utilizado esta vez es compartido entre la femtocelda y la macrocelda, es esta configuración el peor de los casos en cuanto a interferencias, por lo que es necesario la negociación entre las redes para ajustar la potencia radiada con el fin de minimizar los efectos de las interferencias, por lo que no se considera la utilización de sistemas con potencia de transmisión fija.

g) Configuración D. Canal compartido parcial.

Esta configuración se trata de una solución híbrida entre canal dedicado y compartido. El HNB trabaja en frecuencias compartidas con la macrocelda, sin embargo esta tiene mayor ancho de banda, de manera que si detecta algún problema de interferencia, esta puede dejar libre las frecuencias en las que trabaja los HNB y utilizar la parte limpia. La configuración D, es aplicable a configuraciones tanto de grupo cerrado como abierto.

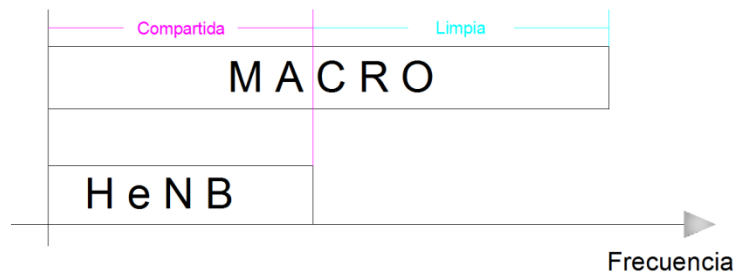


Figura 2. 3: Gestión de frecuencia entre macro-femtoceldas en una configuración D

h) Configuración E. Acceso Abierto, Canal dedicado o compartido.

Esta última configuración es la más libre de todas ya que se aplica para cualquier usuario que tenga cobertura dentro de la femtocelda ya sea en canal dedicado o compartido con otras redes.

2.5 INTERACCION ENTRE MACRO Y FEMTO CELDA

3GPP presenta una serie de situaciones en las que un usuario puede hacer uso de los servicios macro y femto celda, estas son:

- HNB fuera de cobertura GSM o UMTS ofrecido por macroceldas
- HNB dentro de cobertura GSM suministrada por una macrocelda
- HNB dentro de cobertura UMTS suministrada por una macrocelda, ambos entre la misma frecuencia.
- HNB dentro de cobertura UMTS suministrada por una macrocelda, utilizando distintas frecuencias.

Son muchas las ventajas que nos ofrecen las femtoceldas, pero estas características obligan a utilizar de una mejor manera la eficiencia espectral con respecto a las macroceldas. Se realizara un análisis de la interacción entre sistemas femtoceldas, así como sistemas femto-macrocelas. Si bien la interacción entre estos puede ser muy contra productiva para cada sistema, gestionando de una manera adecuada se puede llegar a un beneficio mutuo, llegando las femtoceldas a ser un componente esencial en las redes de telecomunicaciones.

2.5.1 CARACTERISTICAS PROPIAS DE UNA FEMTOCELDA

Con respecto a la gestión de interferencias una femtocelda puede cambiar cualquiera de las siguientes características.

a) Potencia de enlace descendente de la Femtocelda

Si la femtocelda transmite a una potencia elevada, la cobertura será grande, pero existirán miembros del grupo cerrado que no tendrán servicio cerca de la femtocelda, por otro lado, si la femtocelda transmite una potencia pequeña la cobertura puede ser demasiado pequeña como para agrupar a todos los usuarios.

b) Ganancia del receptor femtocelda

Los equipos de cada usuario tiene una potencia de transmisión mínima, por debajo de la cual no puede funcionar por lo que es necesario que la ganancia del receptor fuese lo más pequeña posible, y hacer que la femtocelda sea lo más cerrada posible. Por otra parte no es deseable que los terminales transmitan a una potencia alta, ya que el ruido entre la macro celda que este situada también incrementara

c) Potencia del enlace ascendido del equipo usuario

Si la potencia de transmisión de los equipos del usuario es elevada, esto puede generar demasiadas interferencias dentro de la femtocelda, por lo que debe existir un límite que no se pueda sobrepasar para la potencia de transmisión, pero se debe tener en cuenta que la potencia a la que transmitan sea la necesaria para poder asegurar una conexión entre el equipo del usuario y el punto de acceso. Desde el punto de vista de ahorro de energía de las baterías del usuario es más beneficioso una potencia de transmisión del usuario lo más pequeña posible.

Teniendo en cuenta las características que se pueden variar con respecto a la gestión de interferencia, la 3GGP nos presenta una serie de escenarios con el fin de estudiar y controlar las interferencias generadas.

2.5.2 ESCENARIOS POSIBLES DE INTERFERENCIA

a) Escenario A: Enlace descendente de un macrocelda interfiere en el receptor de un equipo usuario de una femtocelda.

El terminal femtocelda se encuentra cerca de una ventana con visión directa a la antena macro Nodo B situada a una distancia menor a 30m, la antena macrocelda se encuentra completamente cargada y el terminal se encuentra situado en el límite de su femtozona. Este tipo de configuración permite que el impacto de las interferencias sea máximo.

b) Escenario B: Enlace ascendente de la macrocelda interfiere en el enlace ascendente del receptor femtocelda.

Un punto de acceso femtocelda FAP opera en el centro de la vivienda, su localización es en el filo de la cobertura ofrecida por una antena Macro Nodo B. Existen dos terminales, el primero (MUE) conectado con la macrocelda y muy cerca al punto de acceso, y el segundo (FUE) situado en el límite de la femtozona y conectado con FAP. En un momento dado, el equipo usuario MUE realiza una llamada de modo que necesita transmitir con su máxima potencia disponible para contactar con la macro celda.

c) Escenario C: Enlace descendente de la femtocelda interfiere en el receptor del equipo usuario de la macrocelda.

En este caso el usuario macrocelda MUE se encuentra en el filo de su cobertura y muy cercano a un punto de acceso FAP. La femtocelda se encuentra completamente cargada de modo que el enlace descendente de esta interfiere en el receptor del terminal MUE.

d) Escenario D: Enlace ascendente de un terminal femtocelda interfiere en el receptor de la antena macrocelda (Nodo B).

Un usuario femtocelda se encuentra junto a la ventana de un apartamento, el terminal tiene visión directa con la antena macro nodo B situada a 30m. Respecto a la femtocelda el equipo FUE se sitúa en el límite, de modo que para contactar con el punto de acceso FAP debe utilizar el máximo de potencia posible. Esta potencia es recibida por la antena macro nodo B aumentando el nivel de ruido en su receptor.

e) Escenario E: Enlace Descendente de una femtocelda interfiere en el receptor de un femto punto de acceso vecino.

Dos apartamentos adyacentes están equipados con equipos femtocelda (FAP1 y FAP2), creando cada uno un grupo cerrado de usuarios. El usuario FAP2 realiza una visita a su vecino FAP1 situando su terminal muy cercano a dicho punto de acceso y en el filo de su femtozona. Cuando el Usuario FUE1 realiza una llamada, la interferencia recibida en el terminal FUE2 con origen en el punto de acceso será máxima.

f) Escenario F: Enlace ascendente de un terminal femtocelda vecino interfiere en el receptor de un punto de acceso FAP.

Al igual que en el escenario E, existen dos apartamentos adyacentes utilizando tecnología femtocelda. El usuario de FAP2 se encuentra en la vivienda de su vecino situándose en el límite de su cobertura y muy cercano al punto de acceso AP1. El interfiriendo en el receptor del terminal MUE desde su canal adyacente.

g) Escenario J: Enlace Ascendente de un terminal femtocelda interfiere en el canal adyacente del receptor de la antena macrocelda (Nodo B).

Un equipo usuario femtocelda se encuentra localizado junto a la ventana de una vivienda y en el borde de su cobertura. El enlace ascendente del terminal interferirá en el canal adyacente del receptor de una antena macro nodo B que se encuentra a una distancia de 30 metros y con visión directa a la vivienda.

2.6 HAND IN & HAND OUT

Los términos Hand in & Hand out, son términos que hacen alusión a la manera de no perder una llamada en progreso, cuando la estación móvil pasa de una femtozona a una macrozona (Hand out), o cuando una estación móvil pasa de una femtozona hacia otra femtozona (Hand In).

Al realizar una llamada el MS está en constante movimiento dentro o fuera del área de cobertura de una femtocelda, se empiezan a realizar procedimientos los cuales permiten la continuidad de la llamada, para lograr esto la femtocelda intercambia información con el MSC comportándose a la vez como una macrocelda. [20].

Existen cuatro protocolos de handover o handoff básicos utilizados para el control del handover en las redes celulares que son: Network-Controlled Handoff (NCHO), Mobile-Assisted Handoff (MAHO), Soft Handoff (SHO) y Mobile-Controlled Handoff (MCHO)

Network-Controlled Handoff (NCHO): Es un protocolo centralizado donde la decisión de traspaso la toma la red a partir de medidas sobre la señal de un dispositivo móvil, recibido en las estaciones base. Si la señal recibida en la celda actual es peor que la señal recibida en una celda vecina la red toma la decisión de

traspaso. En los mecanismos habituales, el retardo oscila entre 100 y 200 ms que producen una sensación de interrupción notable en la comunicación, sin embargo el retardo de este mecanismo esta entre los 5 y 10 segundo. Este tipo de handover no es adecuado para enlaces con una gran carga de usuarios, NCHO se utilizó en los sistemas 1G (AMPS).

Mobile-Assisted Handoff (MAHO): es un mecanismo que distribuye el proceso de decisión de traspaso. El terminal móvil hace medidas y el MSC toma la decisión de traspaso, en comparación con el NCHO este nuevo mecanismo posee un control más distribuido reduciendo el retardo total a un valor aproximado de 1 segundo.

Soft Handoff (SHO): este Nuevo método se suele utilizar conjuntamente con MAHo. En el transcurso del handover se establece una nueva conexión intermedia entre el MS y la nueva BS, pero aun manteniendo la conexión anterior hasta que la señal recibida en la nueva BS sea optima y procediendo a liberar la conexión anterior. Este método proporciona una conexión continua pero se utilizan más recursos del sistema ya que durante un tiempo de una misma llamada se ocupa dos conexiones.

Mobile-Controlled Handoff (MCHO): en comparación con el NCHO ahora es el terminal móvil el que tiene todo el control sobre el proceso de decisión de traspaso, en este mecanismo el terminal móvil mide constantemente la calidad de la señal de la BS cercanas. MCHO es el grado máximo de descentralización del control de decisiones produciendo niveles muy bajos de retardo en valores alrededor de 100 ms

CAPÍTULO 3.

3. MODELOS DE PROPAGACION Y PARAMETROS DE SIMULACION

Los modelos de propagación son utilizados para calcular la pérdida por trayectoria que una señal de RF pueda tener entre una estación base y un receptor móvil o fijo, teniendo en cuenta varios aspectos radioeléctricos como diversos factores físicos que puedan afectar.

Para la implementación de femtoceldas es necesario analizar el comportamiento del sistema en el que pueda coexistir femtoceldas y macroceldas. En el presente capítulo se analizarán dos modelos de propagación, el primero será el Modelo Multi pared (Multi-Wall), utilizado para propagación en interiores, y el modelo Hata Cost231 que es un modelo de propagación para exteriores.

3.1 PROPAGACION EN INTERIORES, MODELO MULTI-PARED

La propagación en interiores edificios/casas, difiere de la comunicación de radio tradicional, ya que la distancia de radio de cobertura es menor y la variación en el entorno de trabajo es mayor con un pequeño cambio de posición, debido a la influencia que tiene las fachadas y paredes, materiales utilizados y la forma y tipo de vivienda.

El modelo Multi-Pared es un modelo empírico para pérdidas en paredes (European Comisión, 1999, Lott 2001), este modelo considera las pérdidas en el espacio libre más las pérdidas introducidas por las diferentes paredes y pisos, al ser atravesados por la señal transmitida en la trayectoria desde el transmisor al receptor.

[21]

$$L_P(dB) = L_{FS} + \sum_{i=1}^I K_{wi} L_{wi} + K_f \left[\frac{K_f + 2}{K_f + 1} - b \right] L_f \quad (3.1)$$

L_{FS} son las pérdidas en el espacio libre entre el transmisor y el receptor

$$L_{FS}(dB) = L_b + 20 \log_{10}(d)_m$$

Donde:

D es la distancia en metros entre el transmisor y el receptor

L_b son las pérdidas a una distancia de referencia dada d_b que suele ser de 1 m

$$L_b(dB) = 20 \log\left(\frac{4\pi d_b}{\lambda}\right) \quad (3.2)$$

K_{wi} es el numero de paredes atravesadas.

K_f es el numero plantas distantes.

L_{wi} es la perdida por la pared tipo i

L_f es la perdida entre plantas consecutivas

B es un parámetro empírico con un valor óptimo de 0,46

i es el número de tipos de paredes

3.2 PROPAGACIÓN EN EXTERIORES, MODELO HATA COST231

En el presente proyecto a más de tener presenta las perdidas en interiores es necesario considerar las perdidas en exteriores para los escenarios en los que tengamos en cuenta el efecto de estaciones base macroceldas en entornos que utilicen la misma frecuencia que sistemas femtoceldas.

El modelo planteado en este proyecto es el Hata-Cost 231 una versión extendida del Okumura para rangos de frecuencias de 2GHz cubriendo las bandas VHF y UHF. Este modelo empírico consiste en ajustar las perdidas por propagación a las medidas reales en diversos escenarios urbanos. [22]

La expresión de las pérdidas de propagación está dada por:

$$L_b(dB) = 46,3 + 33.9 \log(f) - 13.82 \log(h_t) - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \log(h_t) \log(d)) + C_m \quad (3.3)$$

Donde:

$d(km)$: Distancia expresada en km

$f(MHz)$: Frecuencia expresada en MHz

h_t : Altura de la estación base en metros (m)

h_r : Altura de la estación móvil en metros (m).

$a(h_r)$: Es el factor de corrección por la altura del móvil si $h_r \neq 1.5 m$

$$a(h_r) = 0 \text{ si } h_r = 1.5 m \quad (3.4)$$

Ciudad pequeña-mediana:

$$a(h_r) = 1.1 (\log_{10} f - 0.7) h_r - (1.56 \log_{10} f - 0.8) \quad (3.5)$$

Ciudad Grande:

$$a(h_r) = 3.2 (\log_{10} 11.75 h_r)^2 - 4.97 \quad (3.6)$$

$C_m(dB)$: Es el factor de correlación según el tipo de escenario

$$C_m(dB) = \begin{cases} 0 & \text{para ciudad pequeña – mediana} \\ 3 & \text{para ciudad grande} \end{cases} \quad (3.7)$$

Todos los valores obtenidos para el modelo presentado anteriormente son válidos siempre que los parámetros se encuentren dentro de los siguientes rangos:

$$\begin{aligned} 1500 \text{ Mhz} &< f < 2000 \text{ Mhz} \\ 30 \text{ m} &\leq h_t \leq 200 \text{ m} \\ 1 \text{ m} &\leq h_r \leq 10 \text{ m} \\ d &\geq 500 \text{ m} \end{aligned}$$

3.3 DESVANECIMIENTO POR SOMBRA

El modelo de propagación expresado anteriormente no considera aspectos que producen pérdidas al momento de la propagación como el desvanecimiento sombra o desvanecimiento lento, que es producido por obstáculos que impiden la visión directa entre el emisor y el receptor conocido como efecto shadowing. Teórica y experimentalmente se deduce que este término posee una distribución Gaussiana en dB, con media nula y desviación típica σ que dependerá del entorno y del modelo de cálculo utilizado para la pérdida de propagación.

$$L_{breal} = L_{bmodelo} + X_\sigma \quad (3.8)$$

Para incrementar el porcentaje de cobertura es necesario añadir un margen de seguridad que dependerá del porcentaje de cobertura que se desee, se considera un valor de un 90%, y se considera un margen de $X_\sigma = 1.28\sigma$, y los valores habituales para propagación en interiores de σ esta entre 3 y 4 dB.

En cuanto al efecto shadowing en exteriores, se ha tenido en cuenta que este efecto dependerá de la altura a la que se encuentre el equipo de usuario, así para una altura de 0m el efecto será máximo y se considera nulo cuando la altura del móvil es igual a la altura de la estación base. Por lo tanto el efecto shadowing se expresa de la siguiente forma:

$$X_\sigma(h_r) = (X_\sigma @ 0m) * \left(1 - \frac{h_r}{h_t}\right)^n \quad (3.9)$$

Donde $(X_\sigma @ 0m) = 1.28 \sigma$

En nuestro caso el valor de n sera $n = 1$ para tener un comportamiento lineal, ya que si toma otros valores sera necesario realizar medidas en entornos reales. [23]

3.4 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

En la tabla 3.1 se presentan los parámetros de simulación principales que se han considerado para los respectivos cálculos.

Tabla 3. 1: Parámetros de simulación, [24]

Parámetro		Valor	Unidades
f	Enlace Ascendente	1950	MHz
	Enlace Descendente	2100	
P _{tx_FUE}	Voz	A calcular	dBm
	Datos	23	
G _{FUE}		0	dBi
P _{tx_femto}		23	dBm
Piloto		10% P _{tx_femto}	dBm
G _{femto}		0	dBi
W		3480	Hz
R	Voz	12.2	Kbps
	Datos	120	
Ganancia de procesado: GP	Voz	256	
	Datos	32	
Factor de ocupación: α	Voz	0.66	
	Datos	1	
(Eb/No) _{target}	Voz	7	dB
	Datos	3	
P _n		-100	dBm
Desviación típica por shadowing: σ_{sh}	Interiores	3	dB
	Exteriores	4	
Desviación típica por shadowing: σ_c		0.5	dB
		1	
Coeficiente de correlación: C _{cm}		0	dB
		0.5	
Modelo de Propagación en Interiores: Modelo Multi-Pared	L _{walled}	6.9	dB
	L _{suelo}	18.3	

CAPÍTULO 4.

4. CAPACIDAD DE LAS FEMTOCELDAS

La aceptación celular ha llegado a tal punto que la demanda es tan grande, que las operadoras móviles se ven en la necesidad de incrementar la capacidad de sus redes celulares. Debido al incremento diario de usuarios y aplicaciones, mismas que saturan el escaso espectro radioeléctrico, la exigencia de incrementar la capacidad se intensifica proporcionalmente.

Al hablar de capacidad en una red celular, hace referencia al número de usuarios que pueden acceder al servicio de manera simultánea en una celda. Hay varias maneras de incrementar la capacidad en una red celular, entre ellas el salto de frecuencia, el control de potencia, el uso de small-cells, la implantación de códecs a medio régimen, y la introducción de antenas adaptivas en la estación base.

4.1 CAPACIDAD DE LAS FEMTOCELDAS CON CANAL DEDICADO

Al hablar de canal dedicado, es la asignación de un canal para el uso exclusivo ya sea solo de la femtocelda o de la macrocelda. De manera en que la interferencia entre la femtocelda y macrocelda sea mínima. En un canal dedicado existen dos enlaces: ascendente y descendente. [23] [25]

4.1.1 ENLACE ASCENDENTE

Se considera la ubicación de un usuario i , a una distancia r_{im} de su femtocelda y una distancia r_{id} de la estación base femtocelda de referencia, como se indica en la Figura 4.1. el factor de interferencia intercelular $L(r_{id}, r_{im})$ debido a la distancia y las pérdidas por propagación está dado por :

$$L(r_{id}, r_{im}) = 10^{(L_{im} - L_{id})/10} \quad (4.1)$$

- L_{im} : pérdidas de propagación entre el usuario i y la estación base de la femtocelda m
- L_{id} : pérdidas de propagación entre el usuario i y la estación base de la femtocelda d

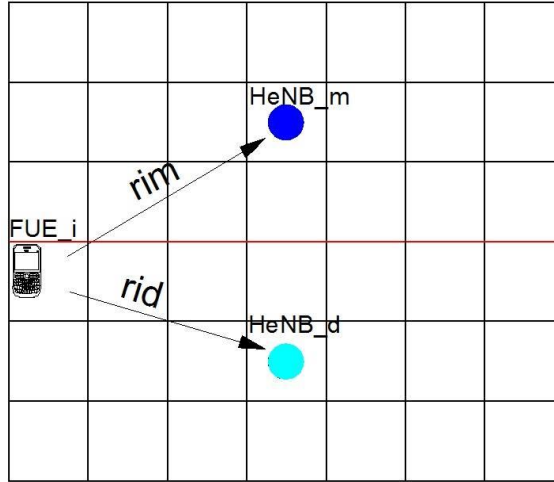


Figura 4. 1: Análisis del enlace Ascendente canal dedicado. (HeNB_d femtocelda de estudio.- HeNB_m femtocelda interferente).

Por otra parte a más de considerar la distancia y las pérdidas de propagación se debe tener en cuenta el efecto del desvanecimiento sombra, cuyo factor de relación de interferencia está dado por:

$$L_{shd}(r_{id}, r_{im}) = 10^{\frac{\xi_{id} - \xi_{im}}{10}} L(r_{id}, r_{im}) \quad (4.2)$$

Donde $\xi_{id} = \xi_{im} = \xi$, son las variables aleatorias Gaussianas de media cero y desviaciones típicas $\sigma_{id} = \sigma_{im} = \sigma_{sh}$

El valor medio de la potencia de la señal recibida por femtocelda para un determinado servicio s es $P_{r,s}$. El valor medio de la potencia de interferencia de un usuario activo comunicándose con la estación base de la femtocelda de referencia y considerando el mismo servicio será también $P_{r,s}$. Se considera que el usuario i no se comunica con la estación base de la femtocelda d pero si se comunica con la estación base de la femtocelda m , cuando las pérdidas de propagación entre el usuario i y la estación base de la femtocelda m sean menores que las pérdidas de propagación entre el usuario i y la estación base de la femtocelda d , es decir si:

$$\phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id}/r_{im}) = 1, \text{ donde}$$

$$\phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id}/r_{im}) = \begin{cases} 1, & \text{si } L(r_{id}, r_{im}) 10^{(\xi_{id} - \xi_{im})/10} \leq 1 \\ 0, & \text{en el resto de casos} \end{cases} \quad (4.3)$$

Para el analisis de la capacidad, hay que tener en cuenta la interferencia intracelular e interferencia intercelular, para lo cual es necesario calcular la esperanza y la varianza de la potencia de interferencia

4.1.1.1 ESPERANZA DE INTERFERENCIA PARA LOS SERVICIOS DE VOZ Y DATOS

Para el calculo de la esperanza se concidera que cada femtocelda tiene una capacidad de $N_{u,s}$ usuarios que requieren del servicio s , el valor esperado de la potencia de interferencia intracelular esta dado por:

$$E[P_{intra}]_s = P_{r,s} a_s (N_{u,s} - k) \quad (4.4)$$

Donde:

- $P_{r,s}$ es la potencia (media) recibida del servicio s por la estacion base
- a_s es el factor de actividad del usuario del servicio s (0,66 para voz y 1 para usuarios de datos)
- $N_{u,s}$ es el numero total de usuarios del servicio s
- $k = 1$ si el servicio s es el de estudio y $k = 0$ si el servicio s no es el de estudio

Por otro lado, el valor esperado de la interferencia intercelular para un servicio s esta dado por la expresion:

$$E[I_{inter}]_s = a_s \sum_{n=1}^{N_{u,s}} L(r_{id}, r_{im}) f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) \quad (4.5)$$

El termino $f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right)$ modela el efecto de shadowing y esta definido por la siguiente ecuacion:

$$f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) = E\left[10^{(\xi_{id}-\xi_{im})/10} \phi(\xi_{id} - \xi_{im}, r_{id}/r_{im})\right] \quad (4.6)$$

$$f\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) = e^{(\beta\sigma)^2/2} Q\left(\beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10}\left\{\frac{1}{L(r_{id}, r_{im})}\right\}\right) \quad (4.7)$$

Donde:

- $\beta = (\ln 10)/10$
- Utilizaremos σ^2 como valor general para la desviacion tipica de las variables aleatorias que representan el efecto shadowing. Para su calculo utilizaremos la siguiente expresion:
 - $\sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2(1 - c_{dm})\sigma_1\sigma_2$ si las desviaciones tipicas de las dos femtoceldas no son iguales.
 - $\sigma^2 = 2(1 - c_{dm})\sigma_{sh}$ si las desviaciones tipicas delas dos femtoceldas son iguales $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{sh}$

Siendo c_{dm} el coeficiente de correlacion de sombra entre femtoceldas

- Q es la funcion Gaussiana dada por:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2/2} dy \quad (4.8)$$

Con todos los valores anteriores se establece que el valor esperado para la potencia de interferencia intercelular para el servicio s vendra dado por la siguiente expresion:

$$E[P_{inter}]_s = P_{r,s} E[I_{inter}]_s \quad (4.9)$$

Teniendo en cuenta un control de potencia imperfecto con una desviacion de error estandar de σ_c (dB), el valor esperado total de potencia de interferencia para el servicio s sera:

$$E[P_{intf}]_{t,s} = e^{\beta^2 \sigma_c^2 / 2} (E[P_{intra}]_s + E[P_{inter}]_s) \quad (4.10)$$

El valor esperado de la potencia total de interferencia debido a todos los servicios sera:

$$E[P_{intf}]_t = \sum_{s=1}^S E[P_{intf}]_{t,s} \quad (4.11)$$

Donde s es el numero de servicios soportados por el sistema.

4.1.1.2 VARIANZA DE LA POTENCIA DE INTERFERENCIA PARA LOS SERVICIOS DE VOZ Y DATOS

La varianza de la potencia de interferencia intracelular para el servicio s se obtiene mediante la expresión:

$$Var[P_{intra}]_s = (N_{u,s} - k)P_{r,s}^2(pa_s - qa_s^2) \quad (4.12)$$

Donde:

$$p = e^{2\beta^2\sigma_c^2} \quad (4.12a)$$

$$q = e^{\beta^2\sigma_c^2} \quad (4.12b)$$

Por otro lado la varianza de la potencia de interferencia intercelular se calcula:

$$Var[P_{inter}]_s = P_{r,s}^2 \sum_i^N [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ pa_s g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) - qa_s^2 f^2\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) \right\} \quad (4.13)$$

Donde:

$$g\left(\frac{r_{id}}{r_{im}}\right) = e^{2(\beta\sigma)^2} Q \left[2\beta\sqrt{\sigma^2} + \frac{10}{\sqrt{\sigma^2}} \log_{10} \left\{ \frac{1}{L(r_{id}, r_{im})} \right\} \right] \quad (4.14)$$

Por lo tanto, la varianza total de potencia de interferencia para el servicio s , esta dado por la suma de las dos anteriores:

$$Var[P_{intf}]_s = Var[P_{intra}]_s + Var[P_{inter}]_s \quad (4.15)$$

Y la varianza de la potencia total de interferencia debido a todos los servicios esta dado por la sumatoria:

$$Var[P_{intf}]_t = \sum_{s=1}^S Var[P_{intf}]_{t,s} \quad (4.16)$$

4.1.1.3 CAPACIDAD DE LA FEMTOCELDA PARA LOS SERVICIOS DE VOZ Y DATOS

Con las expresiones obtenidas anteriormente que nos permiten calcular los valores estadísticos de la potencia de interferencia, podemos calcular para una

probabilidad de bloqueo dada, la relacion señal a interferencia $\left[\frac{C}{I}\right]_s$ para el servicio s como:

$$\left[\frac{C}{I}\right]_s = \frac{P_{r,s}}{P_N + E[P_{intf}]_s + Q^{-1}(a) \sqrt{\text{Var}[P_{intf}]_s}} \quad (4.17)$$

Donde:

- P_N es la potencia de ruido en el receptor.
- $Q^{-1}(a)$ es un factor que depende de la probabilidad de bloqueo (2.05 para una probabilidad de bloqueo del 2% y 2,33 para una probabilidad del 1%)

En la ecuacion (4.16) el denominador esta en funcion del Ruido y de la interferencia

Para un servicio s dado la relacion $\left[\frac{E_b}{N_0}\right]_s$ esta dada por:

$$\left[\frac{E_b}{N_0}\right]_s = \left[\frac{C}{I}\right]_s G_{p,s} \quad (4.18)$$

Donde :

- $G_{p,s} = \frac{W}{R}$ es la ganancia de procesamiento del servicio s
- W es el ancho de banda en (Hz) o tambien llamado tasa de chip (chip rate)
- R es la tasa de bit (Bit Rate) en (Bits/s) y depende del tipo de servicio

Asumiendo un numero dado de usuarios para cada servicio, la relacion probabilidad de bloqueo contra el numero de usuarios puede obtenerse usando las ecuaciones (4.17) y (4.18).

Para el servicio conjunto de voz y datos, la relacion entre potencia maxima de transmision de datos y la potencia maxima de transmision de usuarios de voz en [dB] se obtiene asi:

$$\left(\frac{P_{td}}{P_{tv}}\right)_{dB} = (1 + \delta) \left[10 \log_{10} \left(\frac{G_{pv} / \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_v}{G_{pd} / \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_d} \right) \right] \quad (4.19)$$

Donde:

- P_{td} es la potencia de transmision de los usuarios de datos en el borde de la femtocelda (potencia maxima)
- P_{tv} es la potencia de transmision de los usuarios de voz en el borde de la femtocelda (potencia maxima)
- δ es una constante con valor de 0 si solo se concidera el valor medio de interferencia. Caso contrario si se considera la varianza de la interferencia tomara valores entre -1 a 1, dependiendo de los parametros de los servicios bajo estudio.
- G_{pv} es la ganancia de procesado para el servicio de voz
- G_{pd} es la ganancia de procesado para el servicio de datos
- $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_v$ es el valor requerido de $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)$ para el servicio de voz en numero reales
- $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_d$ es el valor requerido de $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)$ para el servicio de datos en numero reales

4.1.2 ENLACE DESCENDENTE

Para el calculo de la capacidad en un enlace descendente, es necesario considerar la potencia de transmision de una femtocelda, la cual es calculada mediante un valor aproximado a partir de la potencia de transmision de una macrocelda. Si una macrocelda transmite a una potencia de 20 W(43dBm), las microceldas utilizan una decima parte de esta, para las femtoceldas se considerara un valor 100 veces menor de la potencia de una macrocelda, es decir 200mW (23dBm).

Es importante considerar que la distribucion de potencia para los usuarios es del 90% para usuarios y el 10% restante de reserva para transmitir el piloto.

Potencia de reserva para transmitir el piloto:

$$Piloto = 0.1 P_{txfemtoTotal} \quad (4.20)$$

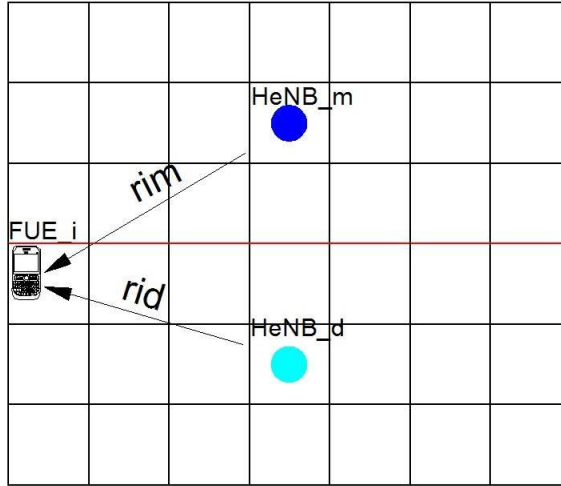


Figura 4. 2: Análisis del enlace Descendente en un canal dedicado. (HeNB_d femtocelda de estudio.- HeNB_m femtocelda interferente).

Potencia de transmisión de la femtocelda para usuarios:

$$P_{txfemto} = \left(1 - \frac{Piloto}{P_{txfemtoTotal}}\right) P_{txfemtoTotal} \quad (4.21)$$

4.1.2.1 ESPERANZA DE INTERFERENCIA PARA LOS SERVICIOS DE VOZ Y DATOS

Para el cálculo de la esperanza de interferencia intracelular se toma como referencia al usuario con mayores pérdidas dentro de la cobertura de la femtocelda m. Una aproximación de la interferencia intracelular, es la suma de las pérdidas de todos los usuarios de la femtocelda normalizadas.

$$A = \frac{1}{l_{p-max}} \sum l_i \quad (4.22)$$

Por lo tanto el valor esperado de la potencia de interferencia del resto de usuarios sobre el peor de ellos será:

$$E[P_{intra}] = (1 - \varphi) \frac{(Piloto + P_{txfemto} \frac{(A-1)}{A})}{l_{p-max}} \quad (4.23)$$

Donde:

- l_{p-max} son las pérdidas de la señal del usuario más alejado dentro de la femtocelda.

- φ es el factor de ortogonalidad que dependera de las condiciones de multitrayecto. Con codigos totalmente ortogonales y sin multitrayecto $\varphi = 1$ y no existiria interferencia de la femtocelda servidora, φ tomara un valor comprendido entre 0.8 y 0.9

Cabe recalcar que para el calculo de la esperanza de la potencia intercelular, se considera que el movil, recibe los 23 dBm de la femtocelda interferente.

Teniendo en cuenta que el factor Q tomara el valor de 1, en este caso debido a que la señal interferente es mas debil que la señal recibida dentro de la propia femtocelda, por lo tanto el valor esperado de la potencia de interferencia intercelular es:

$$E[P_{inter}] = \sum_{i=1}^N P_{rxid} e^{(\beta\sigma)^2/2} \quad (4.24)$$

Donde:

- N es el numero de femtoceldas interferentes
- $P_{rxid} = \frac{P_{txfemtoTotal}}{l_{pid}}$, l_{pid} son las perdidas que sufre el usuario i hasta la femtocelda interferente d .

4.1.2.2 VARIANZA DE LA POTENCIA DE INTERFERENCIA PARA LOS SERVICIOS DE VOZ Y DATOS

En el enlace descendente no existe varianza intracelular ya que el usuario recibe su señal y la senal interferente por el mismo camino. Sin embargo, si estudiamos la interferencia producida por otras femtoceldas dentro del propio edificio o de otros edificios, entonces en estos casos si existira varianza de interferencia intercelular, ya que el usuario recibira la señal de las otras femtoceldas.

La varianza de la potencia de interferencia intercelular viene dada por:

$$Var[P_{inter}] = \sum_{i=1}^N (P_{rxid})^2 \left\{ e^{2(\beta\sigma)^2} - (e^{(\beta\sigma)^2/2})^2 \right\} \quad (4.25)$$

4.1.2.3 CAPACIDAD DE LA FEMTOCELDA PARA LOS SERVICIOS DE VOZ Y DATOS

Al igual que en el caso del enlace ascendente, una vez obtenidos los valores estadísticos de la potencia de interferencia podemos calcular la relación señal a interferencia más ruido del servicio s , pero con una pequeña variación ya que se utilizan códigos ortogonales (OSVF) en el caso de un enlace descendente, permitiéndonos mantener la ortogonalidad entre canales de distintos usuarios y así reducir la interferencia intracelular.

De esta manera la ecuación para la SNR se expresa así:

$$\left[\frac{C}{I} \right] = \frac{\frac{P_{txfemto}}{A \cdot l_{pmax} \cdot a_s}}{E[P_{intra}] + E[P_{inter}] + Q^{-1}(\alpha) \sqrt{Var[P_{inter}]_s} + P_N} \quad (4.26)$$

Donde:

- $\frac{P_{txfemto}}{A \cdot l_{pmax} \cdot a_s}$ es la potencia recibida por el usuario más alejado de la femtocelda.
- a_s es el factor de actividad del usuario que depende del servicio prestado.

4.2 CAPACIDAD DE LAS FEMTOCELDAS CON CANAL COMPARTIDO

Se entiende por canal compartido cuando el espectro que se le asigna a una macrocelda, es también asignado a una femtocelda o cualquier otra red móvil cercana, el hablar acerca de la interferencia en un canal compartido, hay que tener cuidado ya que la interferencia es grande. Al igual que en un canal dedicado, en un canal compartido existen dos enlaces: ascendente y descendente. [23] [20]

4.2.1 ENLACE ASCENDENTE

Cuando existe un canal compartido, y hacer un análisis de enlace ascendente se tendría un escenario como la Figura 4.3.

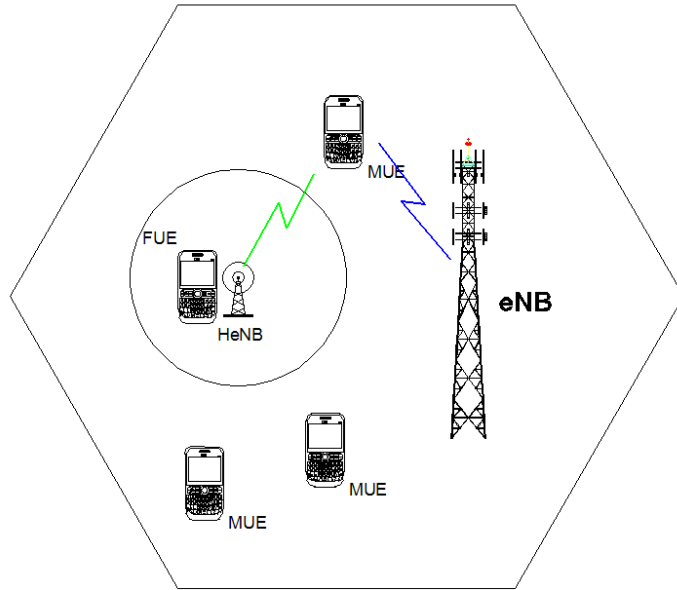


Figura 4. 3: Análisis del enlace ascendente canal compartido. (Azul .- enlace MUE con la macrocelda. Verde .- señal interferente).

Si L_{im} son las pérdidas máximas de un usuario FUE dentro de una femtocelda, y L_{id} son las pérdidas del usuario MUE hacia la femtocelda, el factor relación de interferencia intercelular viene dado por:

$$L(r_{id}, r_m) = 10^{(L_{id}-L_{im})/10} \quad (4.27)$$

4.2.1.1 ESPERANZA DE INTERFERENCIA PARA LOS SERVICIOS DE VOZ Y DATOS

Si una red femtocelda es de tipo CSG, todos los MUE's se consideraran interferencia, por lo que el factor Q queda descartado quedando como esperanza de potencia de interferencia provocada por los MUE's:

$$E[P_{inter_{macro}}]_s = P_{r,s} a_s e^{(\beta\sigma)^2/2} \cdot \sum_{i=1}^{N_{u,s}} L(r_{id}, r_{im}) \quad (4.28)$$

Donde:

$N_{u,s}$ Numero de MUE's interferentes

4.2.1.2 VARIANZA DE LA POTENCIA DE INTERFERENCIA PARA LOS SERVICIOS DE VOZ Y DATOS

De igual manera se desprecia el factor Q, por lo que la varianza para la potencia de interferencia está dado por:

$$\text{Var}[P_{intermacro}]_s = P_{r,s}^2 \sum_i^{N_{u,s}} [L(r_{id}, r_{im})]^2 \left\{ e^{2(\beta\sigma)^2} p a_s - q a_s^2 (e^{(\beta\sigma)^2/2})^2 \right\} \quad (4.29)$$

4.2.1.3 CAPACIDAD DE LAS FEMTOCELAS PARA LOS SERVICIOS DE VOZ Y DATOS

La capacidad en un canal compartido, en un enlace ascendente quedaría determinado por:

$$E[P_{intf}]_{t,s} = e^{(\beta\sigma_c)^2/2} \cdot (E[P_{intra}]_s + E[P_{inter}]_s + E[P_{intermacro}]_s) \quad (4.30)$$

$$\text{var}[P_{intf}]_{t,s} = \text{var}[P_{intra}]_s + \text{var}[P_{inter}]_s + \text{var}[P_{intermacro}]_s \quad (4.31)$$

4.2.2 ENLACE DESCENDENTE

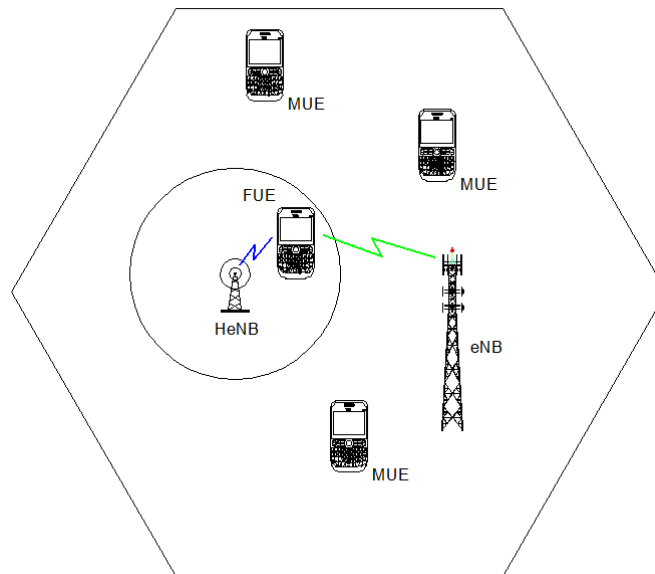


Figura 4. 4: Análisis del enlace descendente canal compartido. (Azul .- enlace FUE con la Femtocelda. Verde .- señal interferente).

En un enlace descendente con canal dedicado, tenemos un escenario tal cual muestra la Figura 4.4

Si el usuario FUE se encuentra al límite de la femtozona, este recibe de la femtocelda una potencia P_m , y una potencia interferente P_{id} , de la macrocelda cerca.

$$P_m = \frac{P_{tx_femto}}{A \cdot l_{p_max} \cdot a_s} \quad (4.32)$$

$$P_{id} = \frac{P_{tx_macro} \cdot g_{tx} \cdot g_{rx}}{l_{p_macro}} \quad (4.33)$$

Donde:

P_{tx_macro} Potencia de la BS

l_{p_macro} Pérdidas desde la BS hasta el FUE

g_{tx} Ganancia BS

g_{rx} Ganancia FUE

4.2.2.1 ESPERANZA DE INTERFERENCIA PARA LOS SERVICIOS DE VOZ Y DATOS

En una femtozona, el tener un escenario de canal dedicado, enlace descendente, toda señal recibida por la macrocelda se considera señal interferente por lo que el factor Q se desprecia. El valor esperado de potencia de interferencia debido a la macrocelda:

$$E[P_{intermacro}]_s = P_{i,d} \cdot \sum_{i=1}^{N_{u,d}} e^{(\beta\sigma)^2/2} \quad (4.34)$$

Donde:

$N_{u,d}$ Numero de BS interferentes

4.2.2.2 VARIANZA DE LA POTENCIA DE INTERFERENCIA PARA LOS SERVICIOS DE VOZ Y DATOS

De igual manera se desprecia el factor Q, por lo que la varianza para la a potencia de interferencia está dado por:

$$Var[P_{intermacro}]_s = P_{i,d}^2 \sum_i^{N_{u,d}} \{e^{2(\beta\sigma)^2} - (e^{(\beta\sigma)^2/2})^2\} \quad (4.35)$$

4.2.2.3 CAPACIDAD DE LAS FEMTOCELDAS PARA LOS SERVICIOS DE VOZ Y DATOS

La capacidad en un canal compartido, en un enlace ascendente quedaría determinado por:

$$E[P_{intf}]_{t,s} = e^{(\beta\sigma_c)^2/2} \cdot (E[P_{intra}]_s + E[P_{inter}]_s + E[P_{intermacro}]_s) \quad (4.36)$$

$$var[P_{intf}]_{t,s} = var[P_{intra}]_s + var[P_{inter}]_s + var[P_{intermacro}]_s \quad (4.37)$$

4.3 CALCULO DE LA CAPACIDADES EN UN CANAL DEDICADO

En el presente apartado se realizara el cálculo de la capacidad de una femtocelda para enlace ascendente y descendente con canal dedicado, para observar cómo influyen las diferentes interferencias en la red femtocelda.

Para el cálculo de la capacidad se realizara una simulación tomando en cuenta dos escenarios diferentes.

4.3.1 CAPACIDAD ENLACE ASCENDENTE

4.3.1.1 ESCENARIO 1

El escenario 1 se ha considerado un inmueble de las siguientes características constructivas:

Número de plantas: 3

Altura de las plantas: 3 (m)

Ancho del inmueble: 30 (m)

Largo del inmueble: 20 (m)

Paredes de concreto-ladrillo con anchura mediana (6.9 dB perdidas)

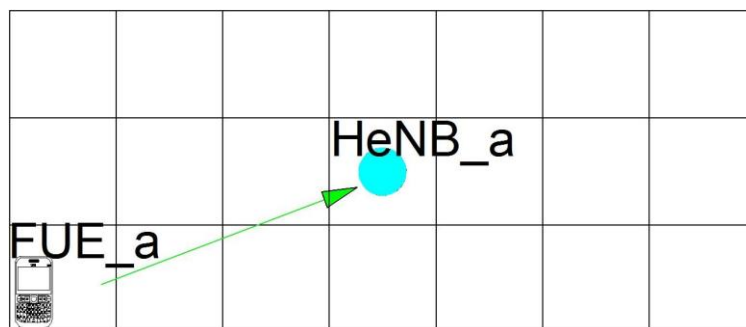


Figura 4. 5: Escenario 1, Femtocelda brindando servicio a edificio de 3 plantas

En la Figura 4.5 se representa el ESCENARIO 1, en el mismo que se ha ubicado el HeNB_a (FAP) al centro del inmueble sirviendo a las 3 plantas, para cálculos se ha considerado la ubicación en la parte superior de la segunda planta y él FUE en el lugar más alejado para realizar los cálculos tomando en cuenta el peor de los casos.

En este escenario se debe considerar únicamente las pérdidas por interferencia intracelular, es decir la causada por usuarios pertenecientes a la misma femtocelda.

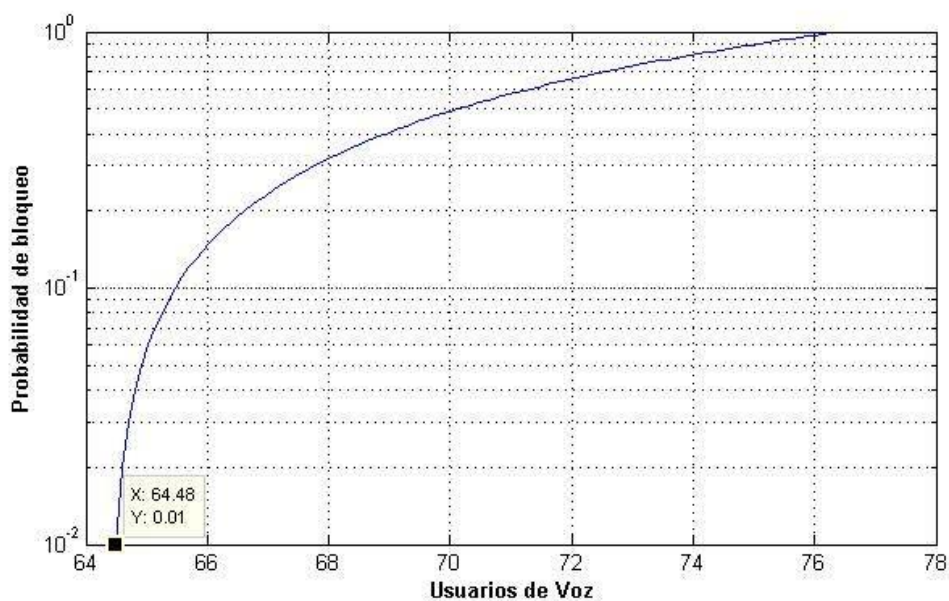


Figura 4. 6: Escenario 1, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz.

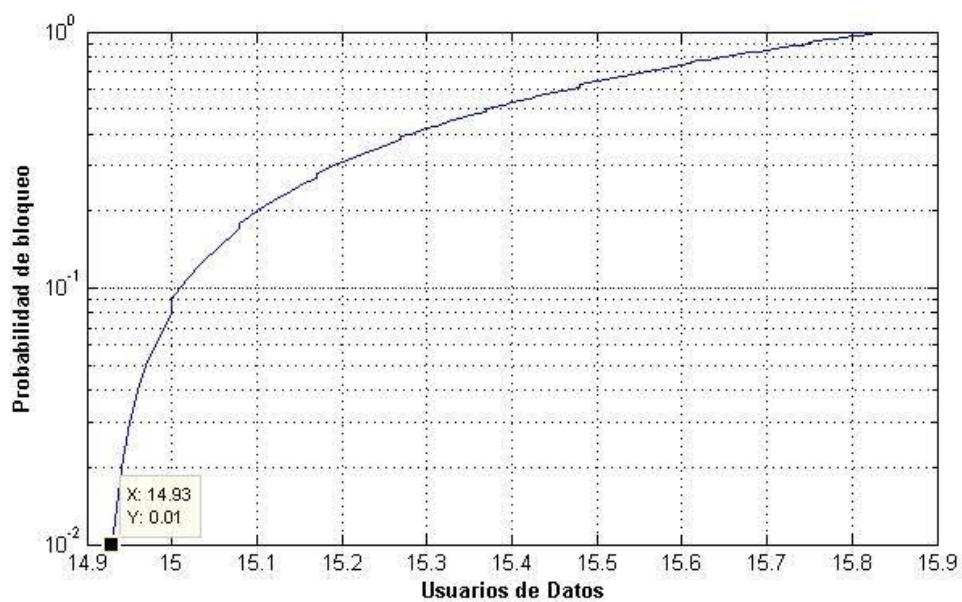


Figura 4. 7: Escenario 1, Capacidad de Usuarios del Servicio de Datos.

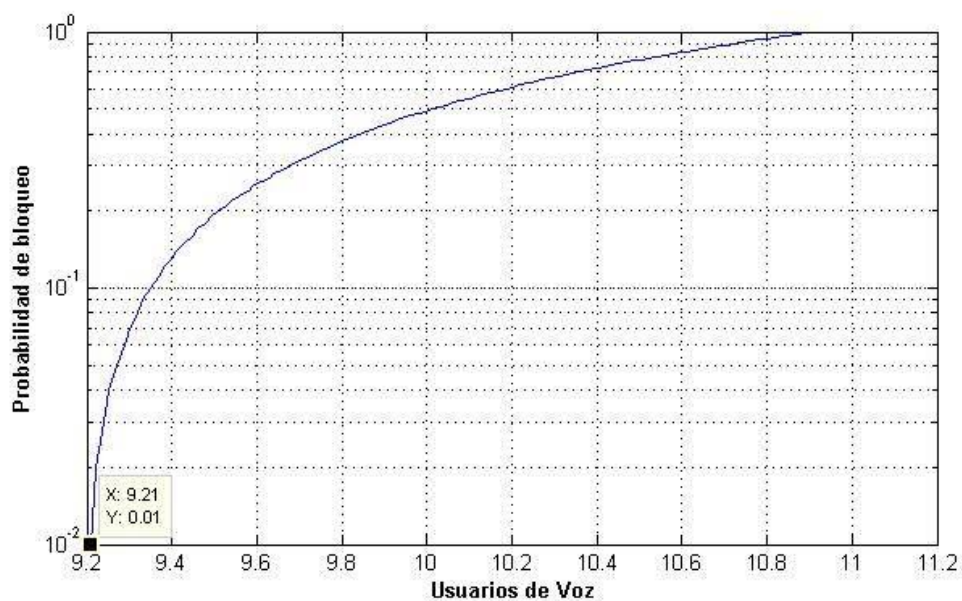


Figura 4. 8: Escenario 1, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz, con 7 usuarios de Datos.

La Tabla 4.1 se presenta las diferentes capacidades calculadas para los diferentes servicios.

Tabla 4. 1: Capacidad de la Femtocelda en el Escenario 1

Cap_voz	Cap_dat	Cap_voz_7 dat
64,48	14,93	9,21

La Figura 4.6 muestra la capacidad correspondiente para el servicio de voz, mientras que en la Figura 4.7 la capacidad pertenece para el servicio de datos, cuando se quiere analizar la capacidad de 2 servicios como son el de datos y voz, la Figura 4.8 muestra este resultado. Para este cálculo de la capacidad, se consideró un número de usuarios de datos fijos, para el cual se tomó la mitad de la capacidad total de datos.

4.3.1.2 ESCENARIO 2

El ESCENARIO 2 se ha considerado un inmueble de las siguientes características constructivas:

Número de plantas: 6

Altura de las plantas: 3 (m)

Ancho del inmueble: 30 (m)

Largo del inmueble: 20 (m)

Paredes de concreto y ladrillo anchura mediana (6.9 dB perdidas)

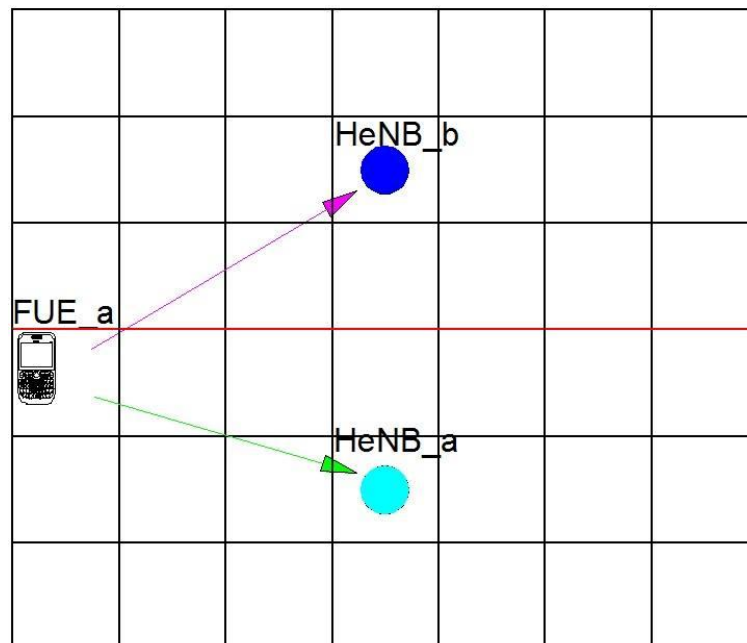


Figura 4. 9: Escenario 2, femtocelda HeNB_b, femtocelda interferente

La Figura 4.9 representa el ESCENARIO 2, de iguales características constructivas que el Escenario 1, pero en este caso se trata de un edificio de 6 plantas, además se ha incrementado un FAP (HeNB_b) de iguales características al

principal, ubicado en la quinta planta alta, y se ha ubicado con la intención de analizar la interferencia de un FAP en el análisis de la capacidad.

La ubicación del usuario se ha considerado en el punto donde la interferencia debido a la femtocelda interferente sea mayor, y a la vez más alejada de la femtocelda a la cual pertenece el usuario.

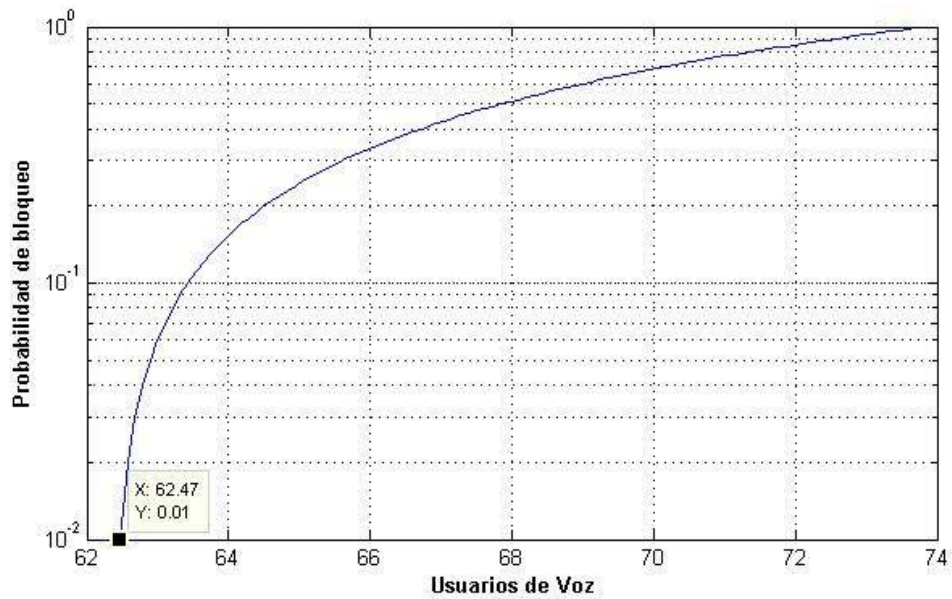


Figura 4. 10: Escenario 2, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz.

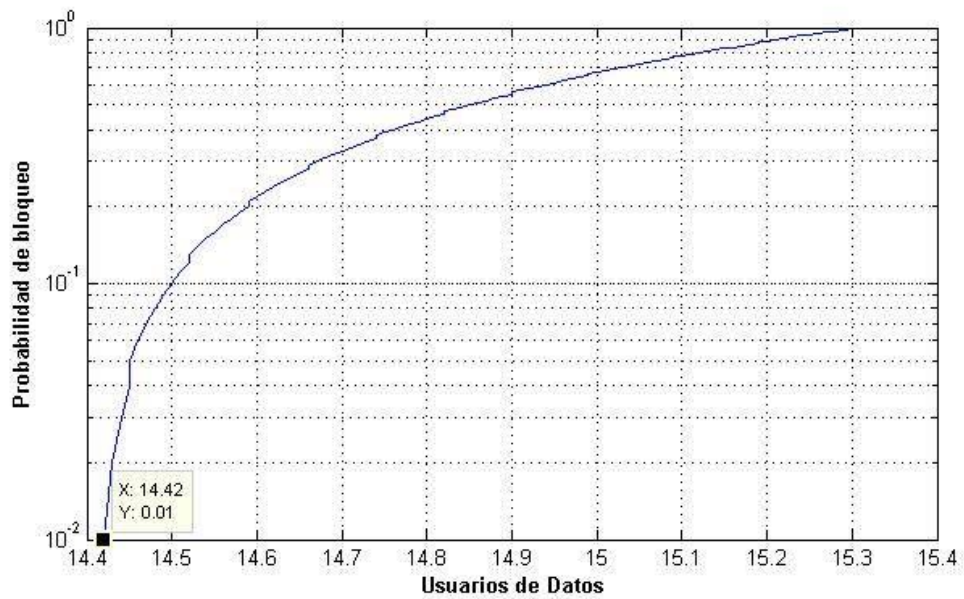


Figura 4. 11: Escenario 2, Capacidad de Usuarios del Servicio de Datos.

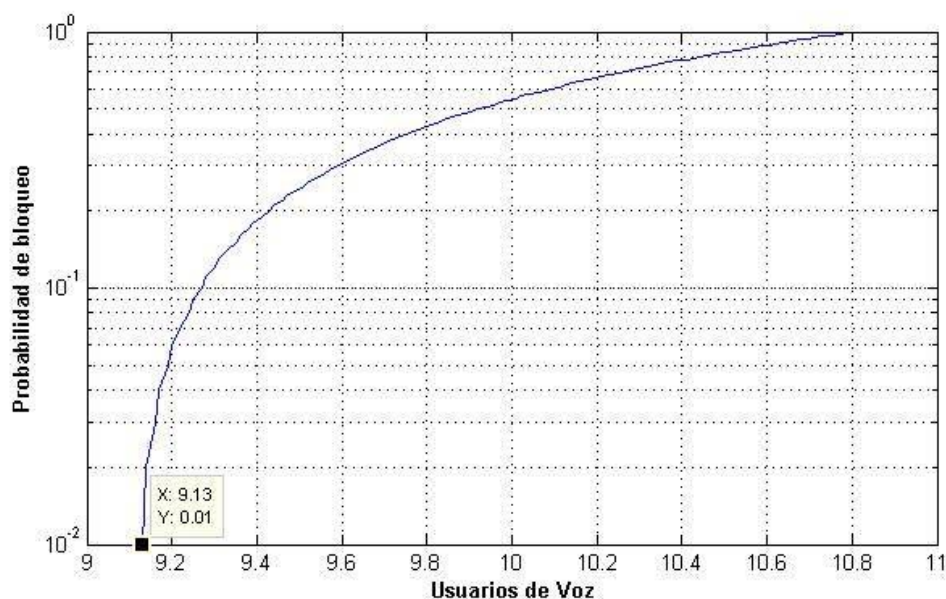


Figura 4. 12: Escenario 2, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz, con 7 usuarios de Datos.

El escenario mostrado en la Figura 4.9, hace alusión a la interferencia que puede provocar el colocar una femtocelda en un lugar cercano a la femtocelda de análisis. Esta femtocelda interferente (HeNB_b, Figura 4.9), provoca una disminución en la capacidad debido a la interferencia intercelular, como se explicó en el apartado 4.1.

La Figura 4.10, muestra la capacidad de la femtocelda al brindar solo un servicio de voz, en cambio la Figura 4.11, muestra la capacidad de la femtocelda al brindar solo servicio de datos, mientras que la Figura 4.12, indica la capacidad al tener un servicio de voz con un número determinado de usuarios de datos, que viene a ser la mitad del número de usuarios de datos.

Tabla 4. 2: Capacidad de la Femtocelda en el Escenario 2.

Cap_voz	Cap_dat	Cap_voz_7 dat
62,47	14,42	9,13

La Tabla 4.2, indica las capacidades calculadas en el Escenario actual. Al hacer una comparación Tabla 4.1 con la Tabla 4.2, es notable que la capacidad en voz, datos y la capacidad con un numero de datos fijos, disminuye, esta disminución en la capacidad es debido a la interferencia Intercelular, que provoca la femtocelda HeNB_b (ver Figura 4.9),

4.3.2 CAPACIDAD ENLACE DESCENDENTE

4.3.2.1 ESCENARIO 3

En el presente apartado se realiza un análisis de la capacidad de una femtocelda al brindar servicio de telefonía móvil en un edificio de 3 plantas, en un enlace descendente.

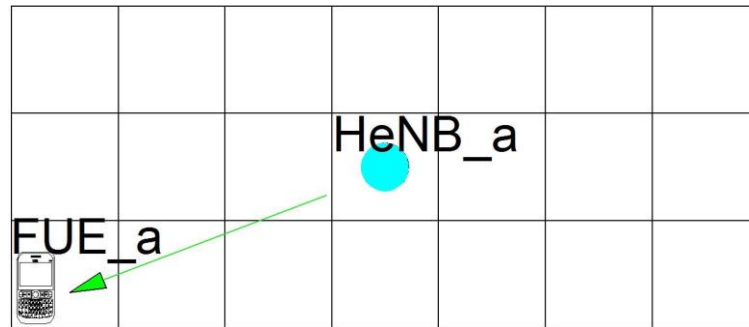


Figura 4. 13: Escenario 3. Femtocelda brindando servicio a un edificio de 3 plantas.

Para el cálculo de la capacidad se debe considerar solo las pérdidas producidas por la interferencia de los usuarios pertenecientes a la femtocelda. Al igual que en los casos anteriores se realizó un cálculo de usuarios de voz, datos, y usuarios de voz para un determinado número de usuarios de datos fijos.

En la tabla 4.3 se puede apreciar los valores de la capacidad calculados para este apartado.

Tabla 4. 3: Capacidad de la Femtocelda en el Escenario 3.

Escenario 3		
Cap_voz	Cap_dat	Cap_voz_20 dat
189,57	39,11	9,02

4.3.2.2 ESCENARIO 4

Para el cálculo de la capacidad en el enlace descendente se debe considerar las pérdidas producidas por la interferencia de los usuarios pertenecientes a la femtocelda y los producidos por la femtocelda interferente.

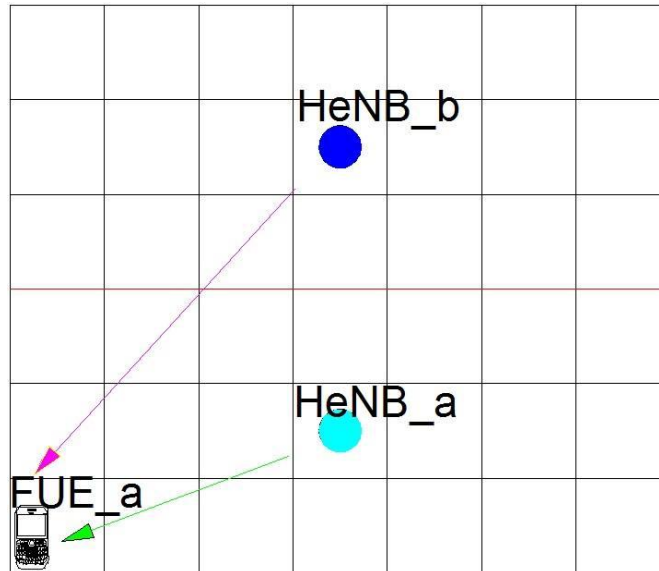


Figura 4. 14: Escenario 4. Femtocelda brindando servicio a 3 plantas, con femtocelda HeNB_b interferente.

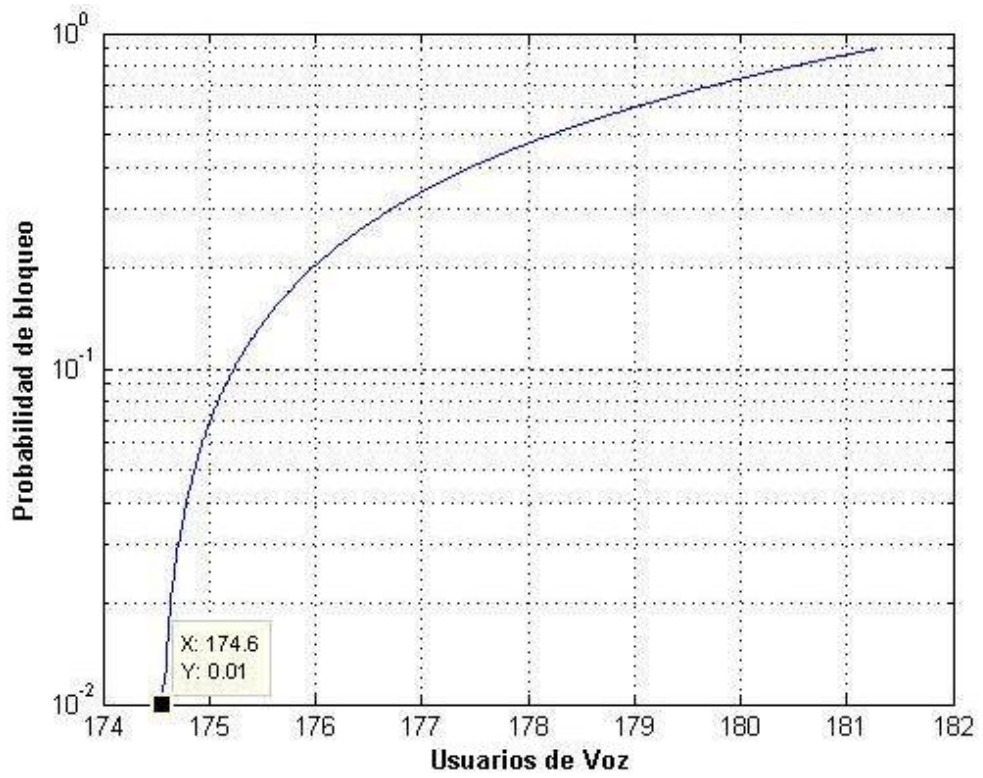


Figura 4. 15: Escenario 4, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz.

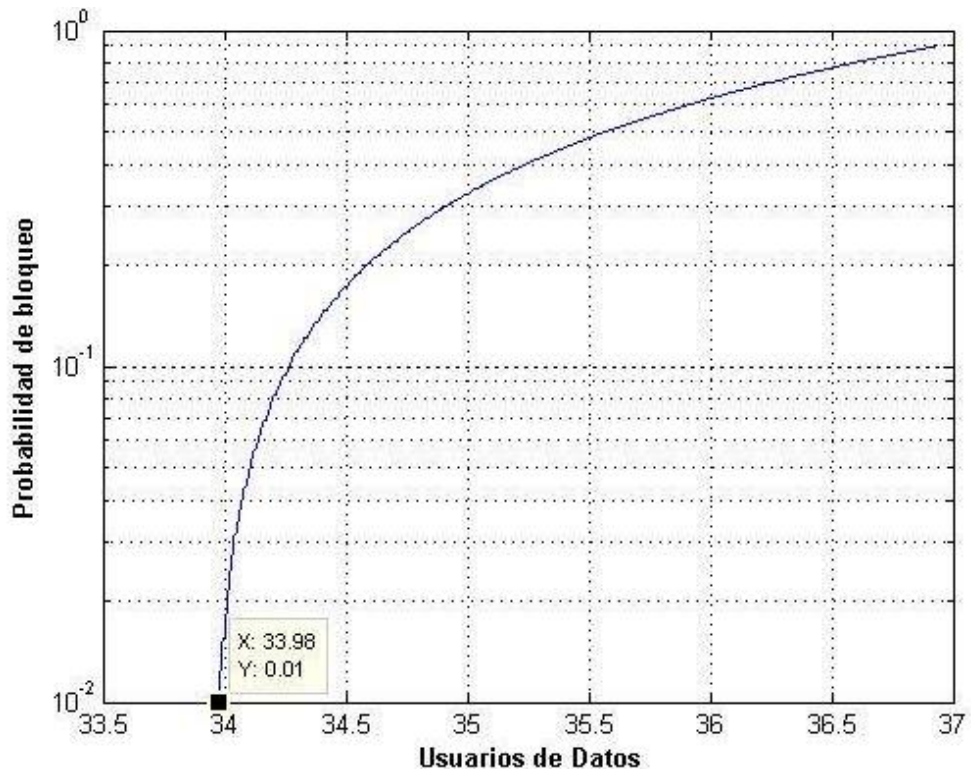


Figura 4. 16: Escenario 4, Capacidad de Usuarios del Servicio de Datos.

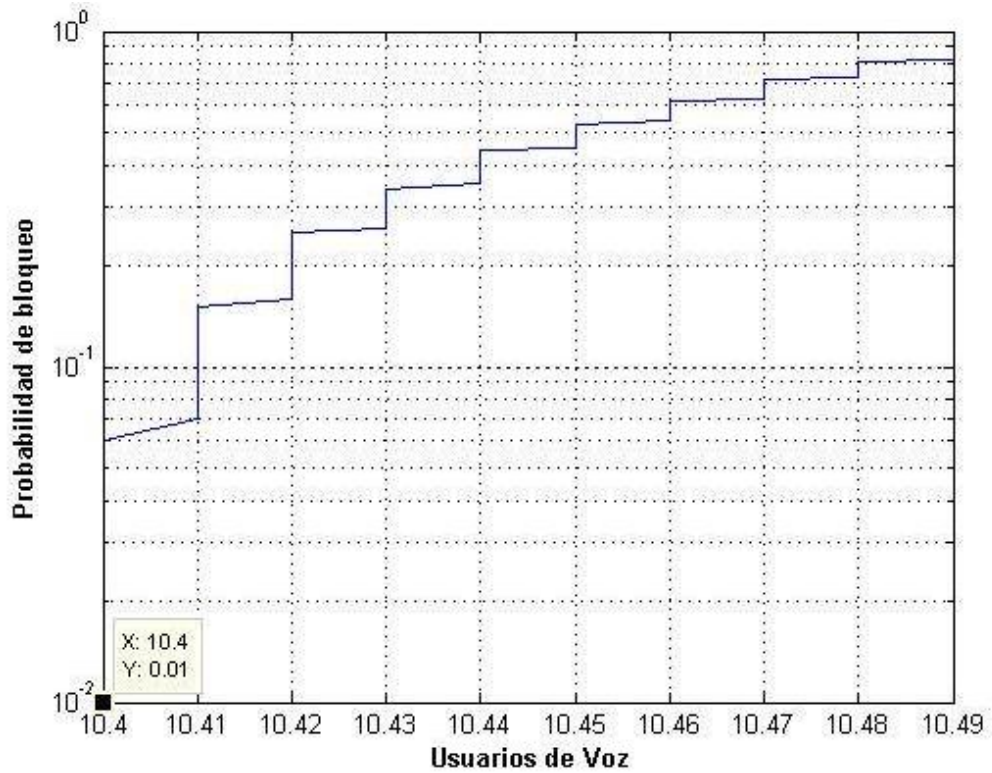


Figura 4. 17: Escenario 4, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz, con 16 usuarios de Datos.

En la tabla 4.4 se puede apreciar los valores de la capacidad calculados para este apartado.

Tabla 4. 4: Capacidad de la Femtocelda en el Escenario 4.

Escenario 4		
Cap_voz	Cap_dat	Cap_voz_16 dat
174,56	33,98	10,4

En la figura 4.15 se puede observar la capacidad de la femtocelda para brindar un servicio de voz, en la figura 4.16 se observa la capacidad de usuarios para el servicio de datos, mientras que en la Figura 4.17 se observa la capacidad para un servicio combinado de voz y datos, en el cual se considera para los cálculos un número de usuarios de datos fijos correspondiente a la mitad (16 usuarios de datos).

4.4 CALCULO DE LA CAPACIDADES EN UN CANAL COMPARTIDO

En el presente apartado se realizara el cálculo de la capacidad de una femtocelda para enlace ascendente y descendente con canal compartido, de tal forma que se pueda observar la influencia de macroceldas cercanas a femtoceldas que utilizan el mismo espectro.

La capacidad en un canal compartido será realizada en 4 escenarios diferentes, de manera que se pueda comparar y ver los efectos producidos por las diferentes interferencias.

4.4.3 CAPACIDAD ENLACE ASCENDENTE

4.4.3.1 ESCENARIO 5

El Escenario 5 se ha considerado el mismo inmueble del Escenario 1 pero en este caso se estudiara la interferencia producida por usuarios macro celda pertenecientes al eNB.

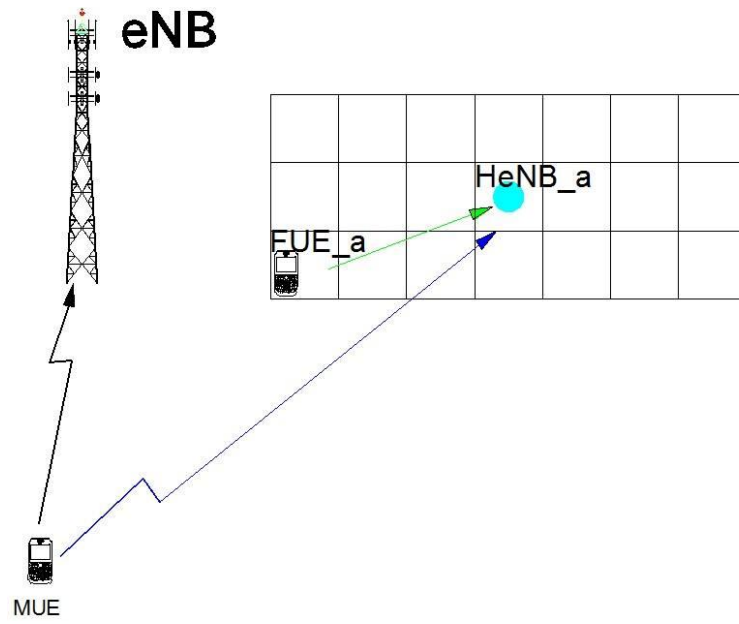


Figura 4. 18: Escenario 5, Femtocelda sirviendo a 3 plantas, con interferencia MUE.

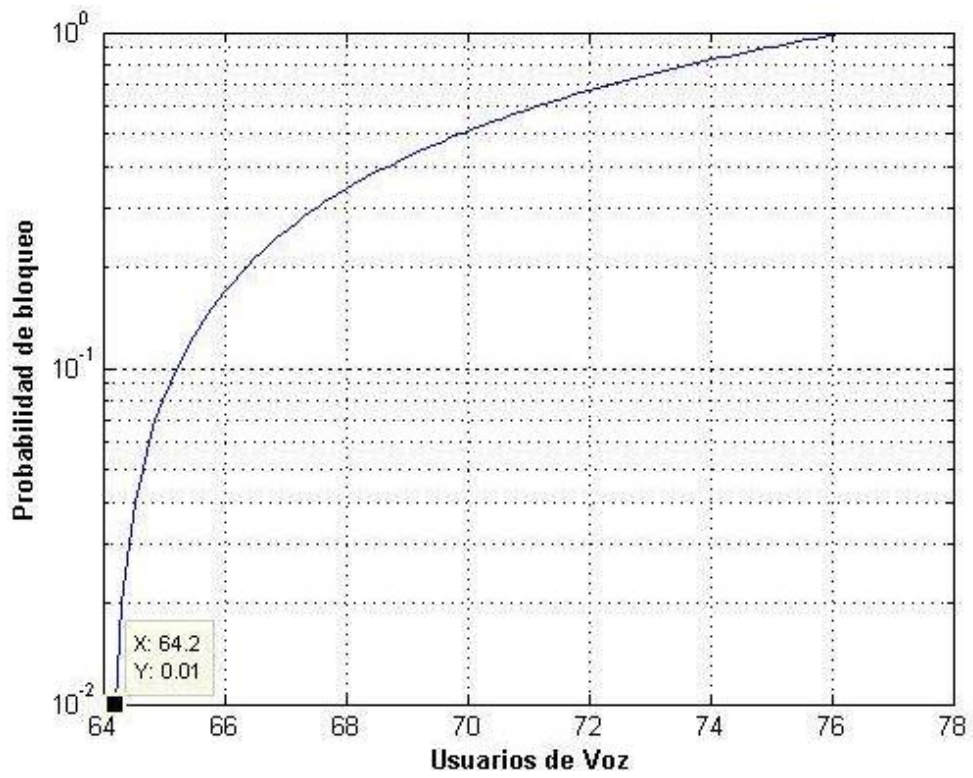


Figura 4. 19: Escenario 5, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz.

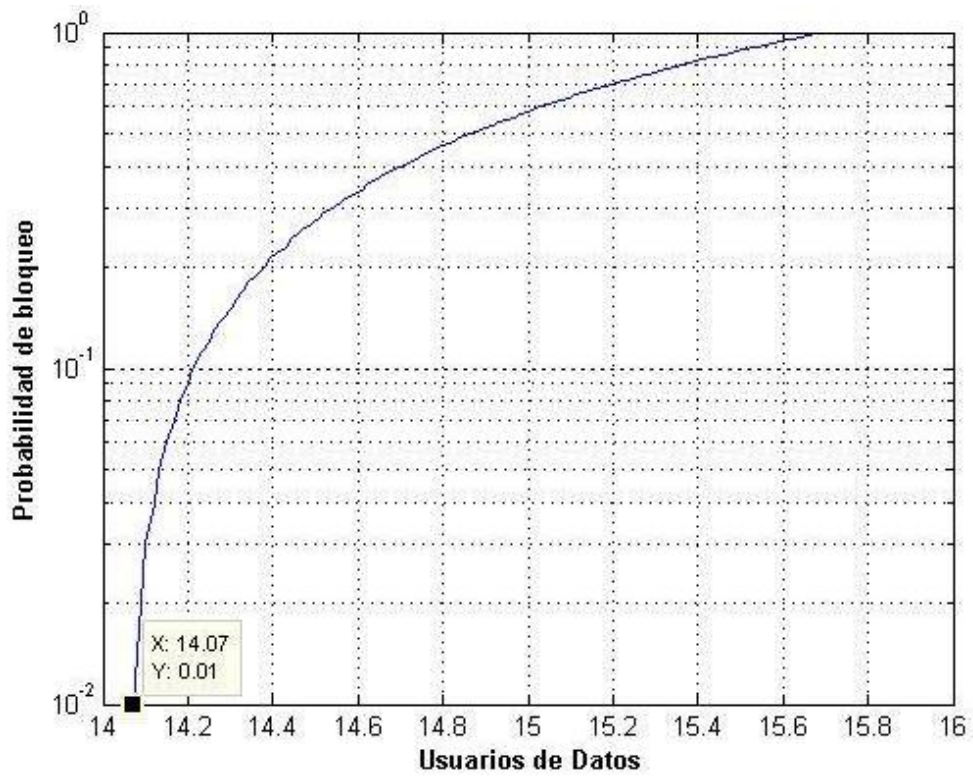


Figura 4. 20: Escenario 5, Capacidad de Usuarios del Servicio de Datos.

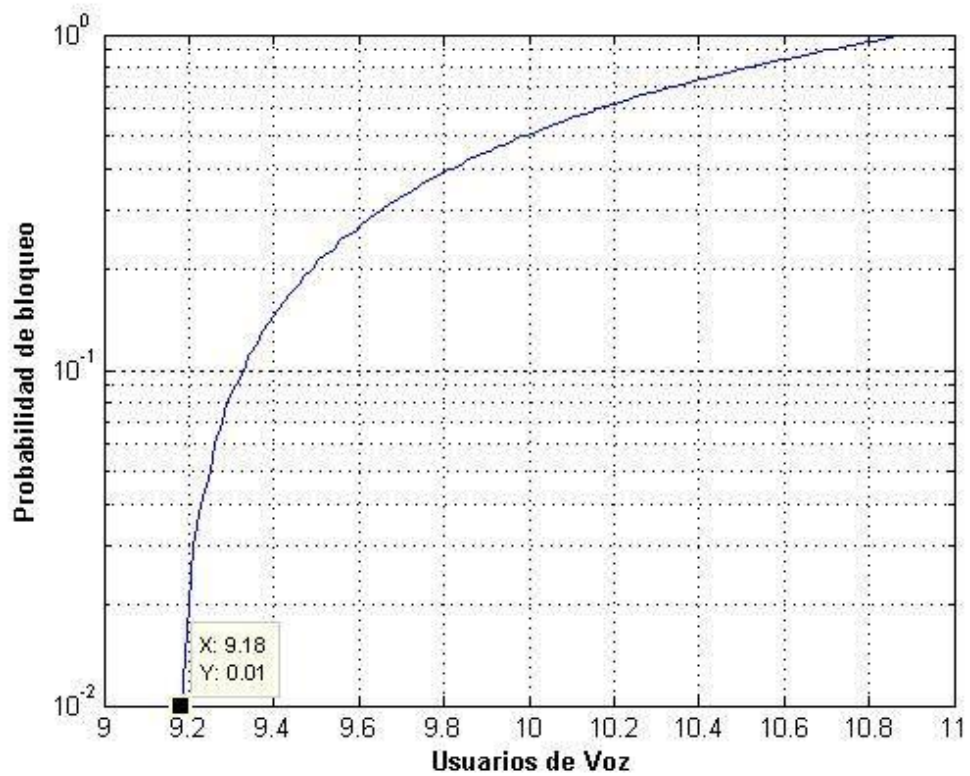


Figura 4. 21: Escenario 5, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz, con 7 usuarios de Datos.

En la Tabla 4.5 se puede apreciar los valores de la capacidad calculados para este apartado.

Tabla 4. 5: Capacidad de la Femtocelda en el Escenario 5.

Escenario 5			
Cap_voz	Cap_dat	Cap_voz_7 dat	Num_usu_macro
64,2	14,07	9,18	4

En este escenario de igual forma se procedió a calcular la capacidad de usuarios para el servicio de voz como se puede observar en la figura 4.19. En la figura 4.20 se puede observar la capacidad para el servicio de datos y en la figura 4.21 como en los escenarios anteriores se observa la capacidad para un servicio combinado de usuarios de voz y datos. A parte de la interferencia intracelular que existe por parte de usuarios de la misma femtocelda, se suma la interferencia provocada por MUE's, cabe recalcar que para este escenario se consideró 4 MUE.

4.4.3.2 ESCENARIO 6

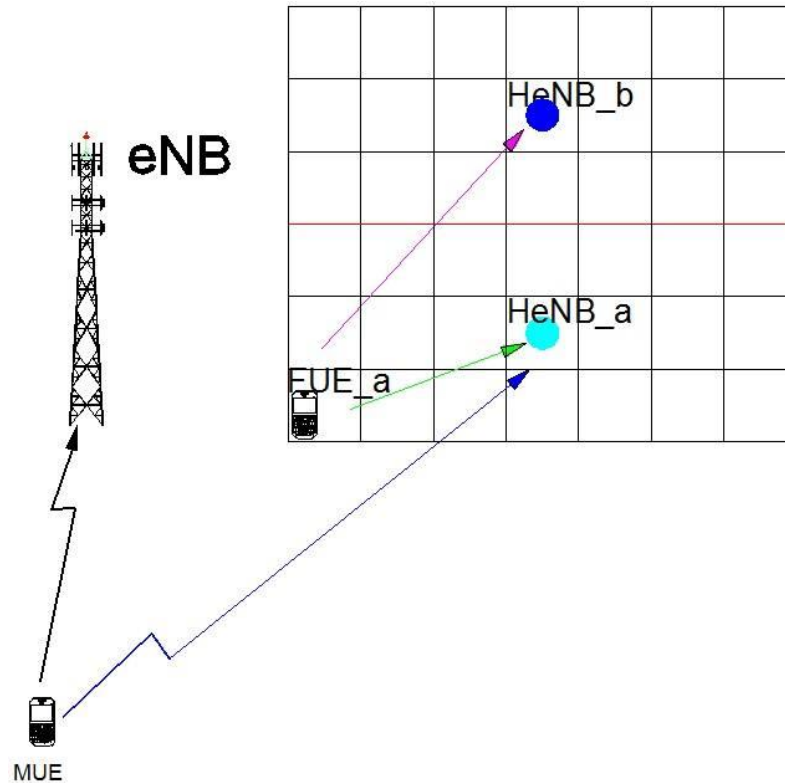


Figura 4. 22: Escenario6, MUE y HeNB_b interferencias.

Para el cálculo de la capacidad en el escenario mostrado en la Figura 4.22, se ha considerado la interferencia que puede producir un MUE y un FAP cercano (HeNB_b).

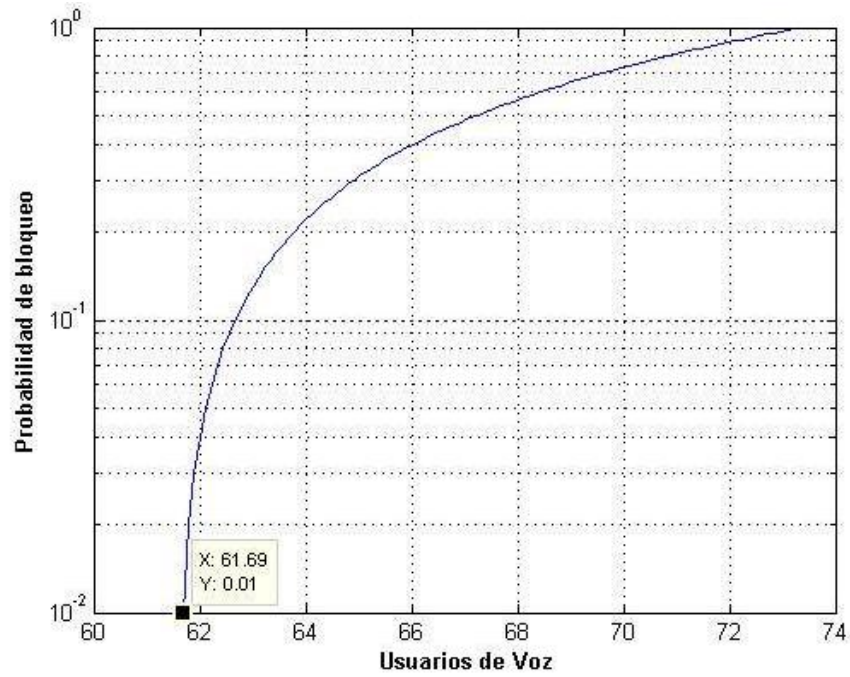


Figura 4. 23: Escenario 6, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz.

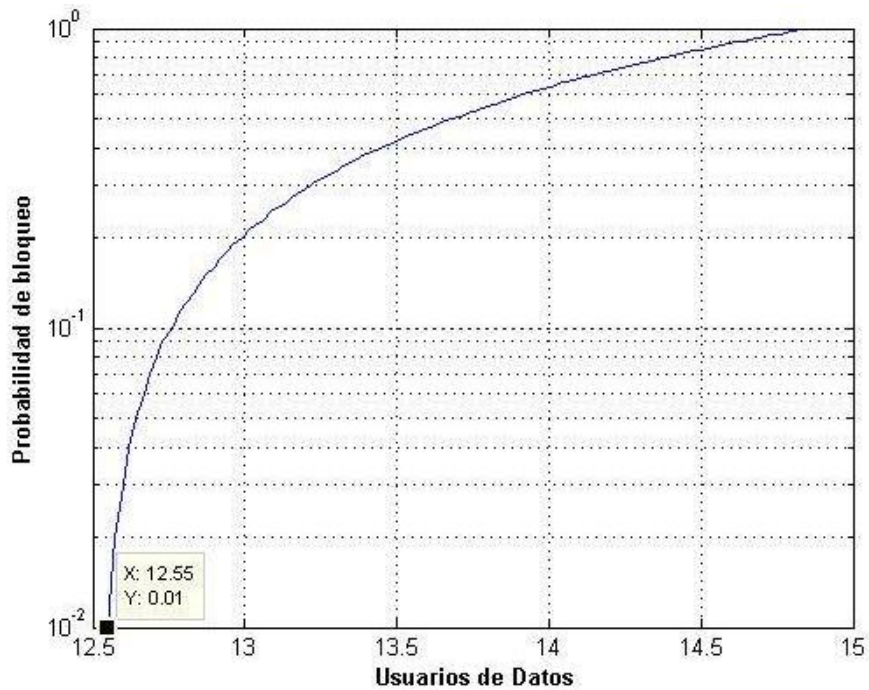


Figura 4. 24: Escenario 6, Capacidad de Usuarios del Servicio de Datos.

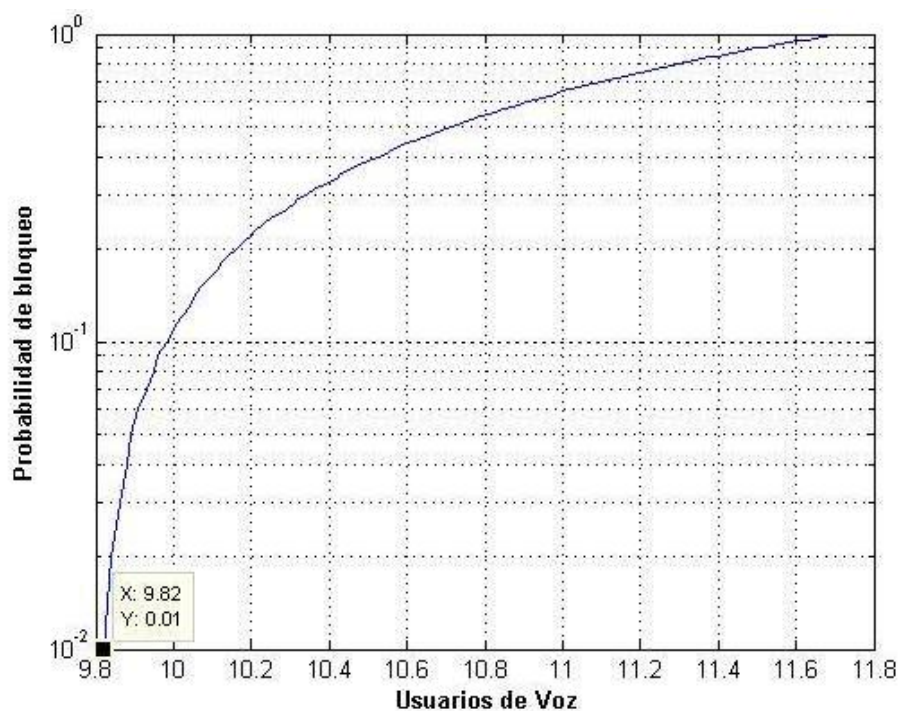


Figura 4. 25: Escenario 6, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz, con 6 usuarios de Datos.

En la Tabla 4.6 se puede apreciar los valores de la capacidad calculados para este apartado.

Tabla 4. 6: Capacidad de la Femtocelda en el Escenario 6.

Escenario 6			
Cap_voz	Cap_dat	Cap_voz_6 dat	Num_usu_macro
61,69	12,55	9,82	4

La Figura 4.23 y Figura 4.24, indican las capacidades de voz y datos respectivamente, mientras que la Figura 4.25, muestra la capacidad de usuarios de voz al tener 6 usuarios de datos. Estos resultados fueron obtenidos considerando la interferencia producida por 4 MUE's, y la interferencia producida por un FAP (HeNB_b) cercano.

4.4.4 CAPACIDAD ENLACE DESCENDENTE

4.4.4.1 ESCENARIO 7

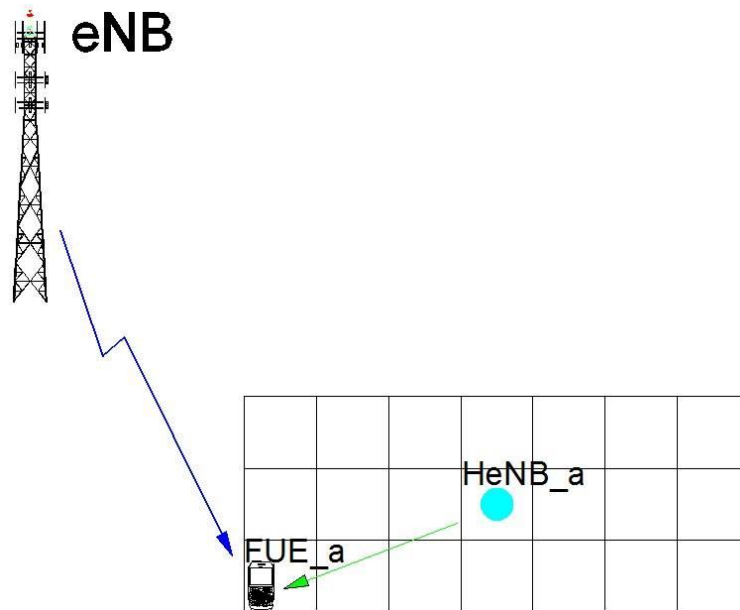


Figura 4. 26: Escenario 7, eNB interferente

El escenario de este apartado, hace alusión a la capacidad en un enlace descendente cuando existe interferencia por parte de una macrocelda, al hacer uso de un espectro compartido.

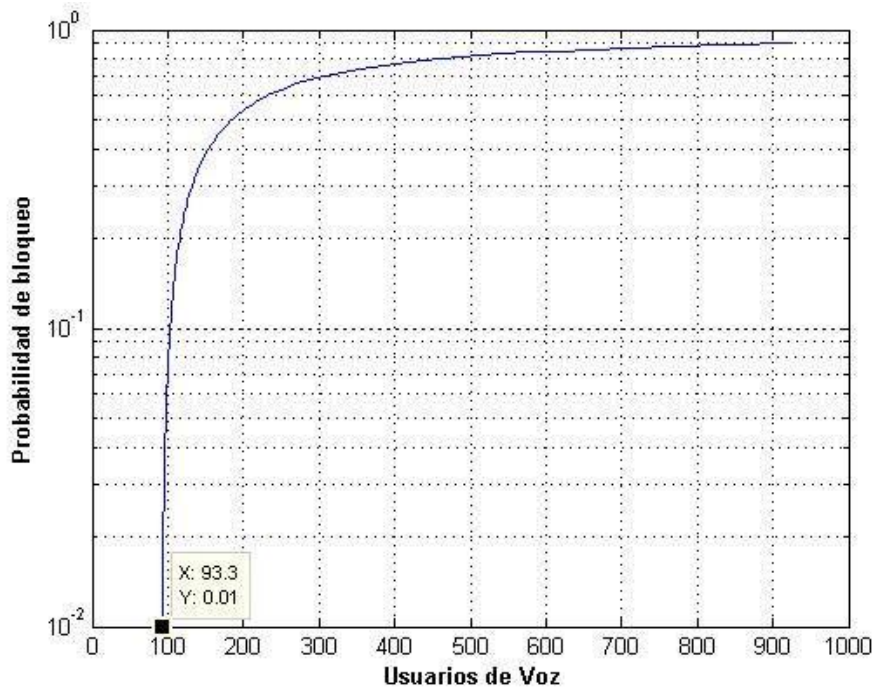


Figura 4. 27: Escenario 7, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz.

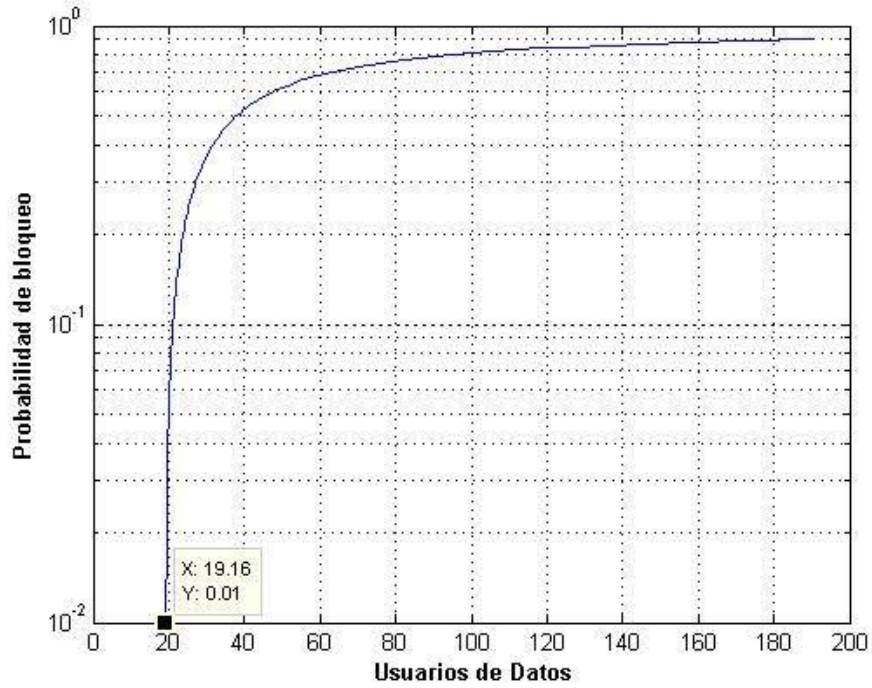


Figura 4. 28: Escenario 7, Capacidad de Usuarios del Servicio de Datos.

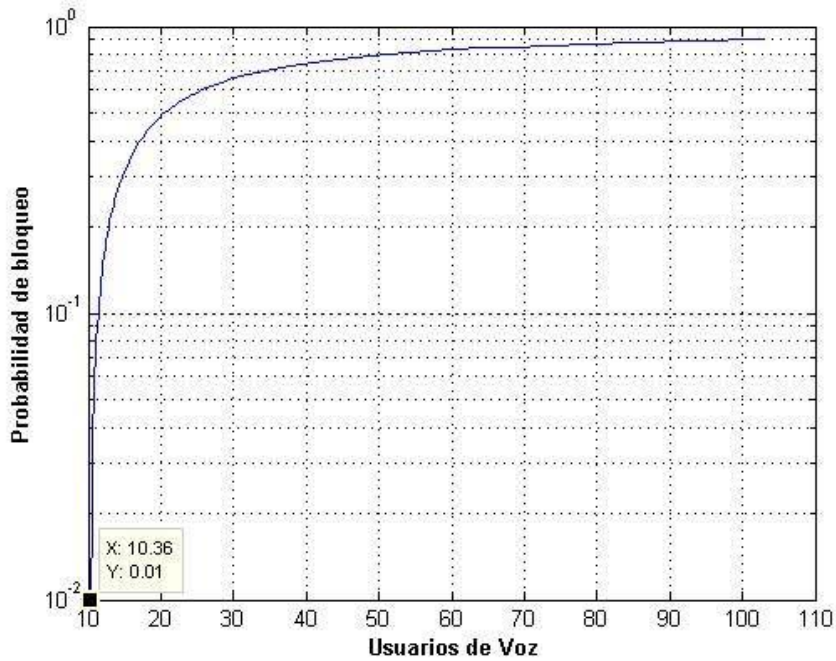


Figura 4. 29: Escenario 7, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz, con 8 usuarios de Datos.

En la tabla 4.7 se puede apreciar los valores de la capacidad calculados para este apartado.

Tabla 4. 7: Capacidad de la Femtocelda en el Escenario 7.

Escenario 7			
Cap_voz	Cap_dat	Cap_voz_8 dat	Num_macro_inter
93,3	19,16	10,36	1

En este escenario de igual forma se procedió a calcular la capacidad de usuarios para el servicio de voz como se puede observar en la Figura 4.27. En la Figura 4.28 se puede observar la capacidad para el servicio de datos, mientras que la Figura 4.29 muestra la capacidad de usuarios de voz con 8 usuarios de datos. Aparte de la interferencia intracelular, también la capacidad hace alusión a la interferencia provocada por una macrocelda que se encuentre cerca de la femtocelda.

4.4.4.2 ESCENARIO 8

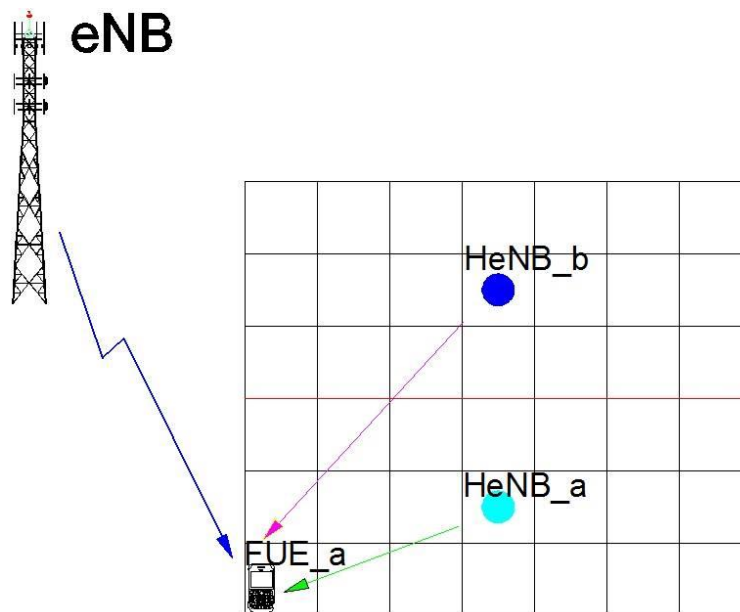


Figura 4. 30: Escenario 8, eNB & HeNB_b interferencias

El Escenario 8 se ha considerado un escenario más cercano a la realidad en el caso de la implementación de femtoceldas, ya que se considera una femtocelda vecina y dentro de la cobertura de una macrocelda, al compartir el mismo espectro.

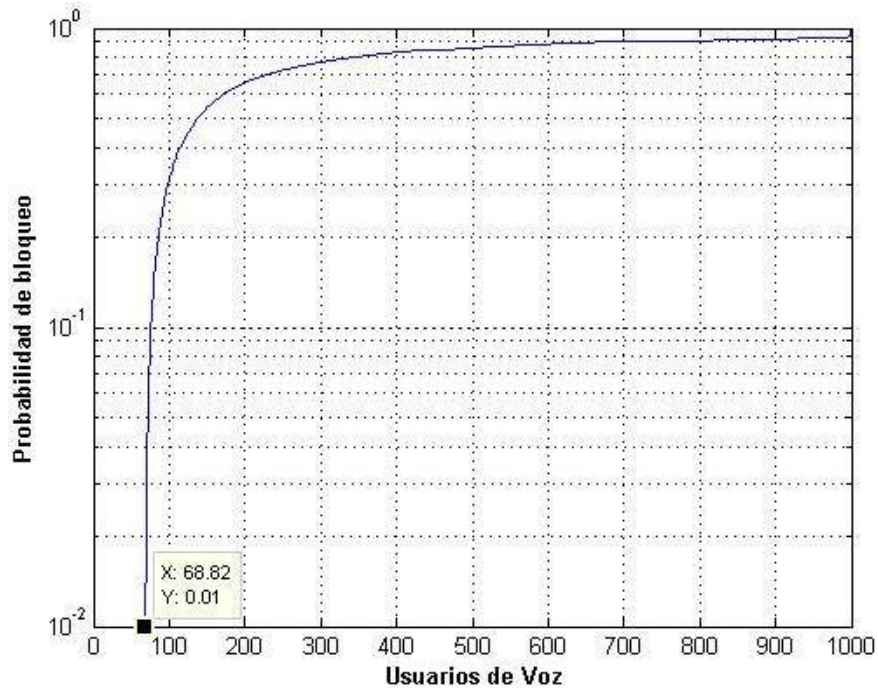


Figura 4. 31: Escenario 8, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz.

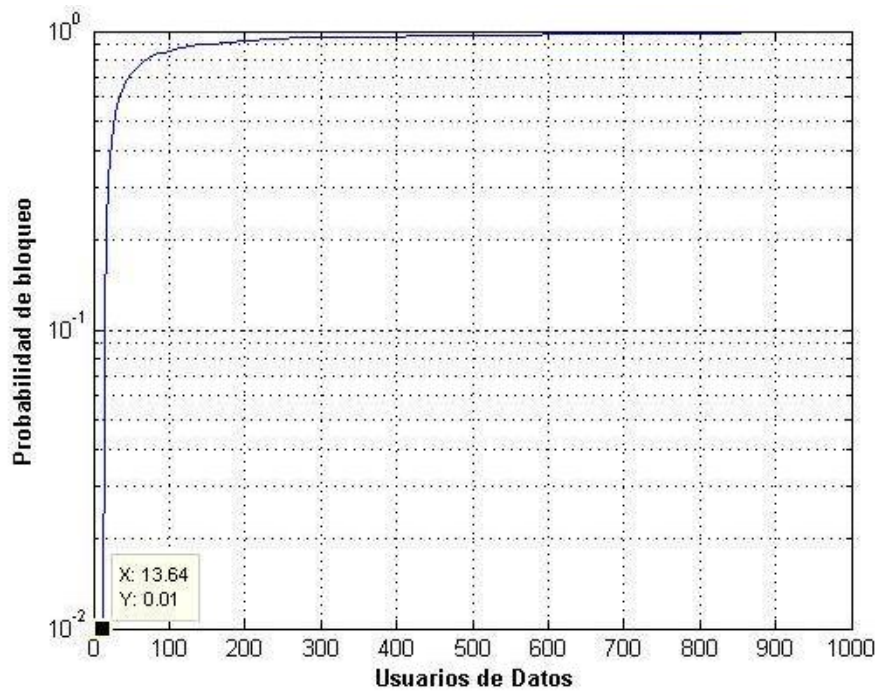


Figura 4. 32: Escenario 8, Capacidad de Usuarios del Servicio de Datos.

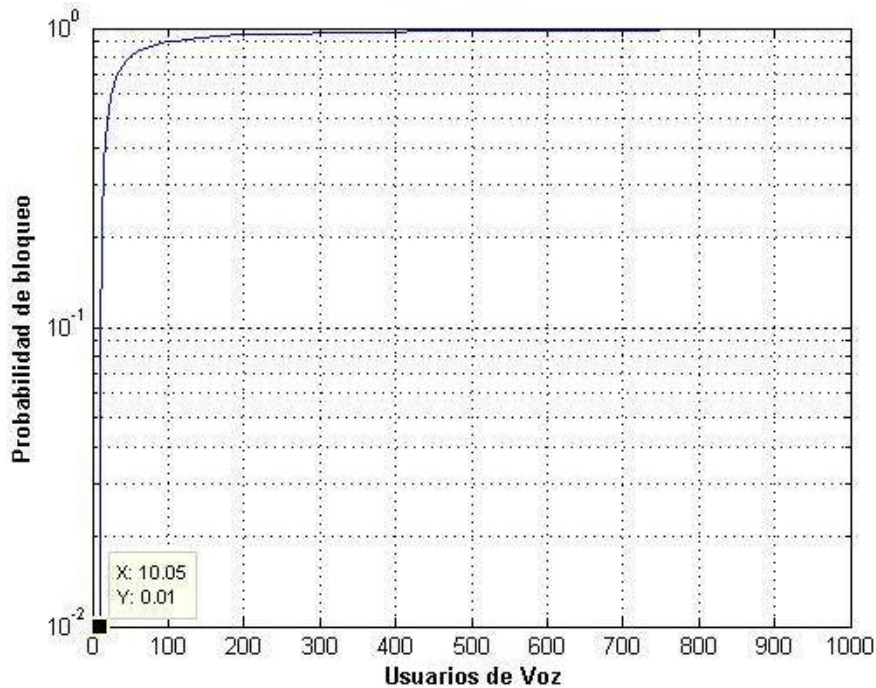


Figura 4. 33: Escenario 8, Capacidad de Usuarios del Servicio de Voz, con 6 usuarios de Datos.

En la tabla 4.8 se puede apreciar los valores de la capacidad calculados para este apartado.

Tabla 4. 8: Capacidad de la Femtocelda en el Escenario 8.

Escenario 8			
Cap_voz	Cap_dat	Cap_voz_6 dat	Num_macro_inter
68,82	13,64	10,05	1

La capacidad de voz y datos es mostrado en la Figura 4.31 y Figura 4.32 respectivamente, mientras que la Figura 4.33 muestra la cantidad de usuarios de voz con 6 usuarios de datos. En este escenario se consideró la interferencia provocada por una macrocelda y una femtocelda vecina, las cuales comparten el mismo espectro.

4.5 MEJORA DE LA CAPACIDAD DE UN OPERADOR MOVIL

Un parámetro importante en la mejora de la capacidad de un operador móvil es la calidad del servicio brindado, (GoS), esta calidad de servicio en comunicaciones inalámbricas es del 2%. La mejora de la capacidad no debe comprometer la calidad, por lo que se ha visto la necesidad de calcular el nuevo GOS al implementar un sistema femtocelular.

Con la ayuda de un software se ha obtenido la capacidad de una macrocelda con tecnología WCDMA. Los parámetros considerados para la capacidad de una macrocelda son:

- Tasa de transmisión	144 Kbps
- GOS	2%
- Radio de la Celda	0.9185 Km
- Patrón de reuso	7
- Espectro asignado	40 MHz
- Ancho canal	60 KHz
- Promedio llamadas	1 llamada/hora
- Promedio duración	2 min/llamada

Para el cálculo del radio de la celda es necesario el modelo de Okumura HATA, para lo que se tuvo que considerar los siguientes parámetros. [26]

Parámetros del Transmisor (MS)

- Potencia de transmisión	24 dBm
- Ganancia antena móvil	2 dBi
- Perdidas por cuerpo	0 dBi

Parámetros del Receptor (BS)

- Densidad de ruido térmico	-174 dBm/Hz
- Figura de ruido del receptor de la BS	5dB
- Margen de interferencia	3 dB
- Eb/No	1.5 dB
- Ganancia de la antena BS	18 dBi
- Perdidas de cable BS	2 dB
- Margen de rápido desvanecimiento	4 dB
- Margen de desvanecimiento log-normal	4.2 dB
- Ganancia soft-handover	2 dB
- Perdidas en interiores	15 dB

Con los parámetros antes mencionados es posible sacar las pérdidas que se puede dar en un enlace con una tasa de datos de 144 kbps, y a la vez el radio de la macrocelda con la capacidad que es posible abarcar en una determinada área de cobertura.(ver Figura 4.34) [26]

Los datos obtenidos de la macrocelda son:

- Área de cobertura 1300 Km²
- Radio de la celda 0.91 Km
- Usuarios por celda 2494

Figura 4. 34: Interfaz del Software para el cálculo de la Capacidad de la Macrocelda

A partir de la capacidad de una macrocelda y de la capacidad de una femtocelda, procedemos a calcular el nuevo GoS, que se daría en el caso de implementar un sistema femtocelular.

La capacidad de usuarios de la macrocelda se consideró el valor de 2494, mientras que en la capacidad de la femtocelda se tomó el valor de 12,55 usuarios, se ha considerado este valor ya que es el menor número de usuarios que se daría en el peor de los casos, (canal compartido, enlace ascendente, transmisión de datos).

Para la determinación del GoS mejorado lo que se debe tomar en cuenta es el trafico cursado de la red macrocelda (83,1335 E) y el trafico cursado por la femtocelda (0,41833 E). Al implementarse una femtocelda el trafico atendido por la

macro ya no será el total del tráfico cursado (red macro) ya que parte de este será atendido por la femtocelda. Con este nuevo tráfico cursado se procedió a calcular el nuevo valor del GoS mediante la fórmula 4.36

$$B = \frac{\frac{A^N}{N!}}{\sum_{k=0}^N \frac{A^k}{k!}} \quad (4.38)$$

Donde:

- B es el Grado de Servicio (GoS) en %
- K= Número de llamadas en progreso
- N = número de servidores

El nuevo GoS (Figura 4.35), indica que la implementación de femtoceldas aparte de aumentar la capacidad de un operador móvil, mejora la calidad, que a fin de cuentas es lo que los usuarios buscan, capacidad y calidad en las comunicaciones. [3]

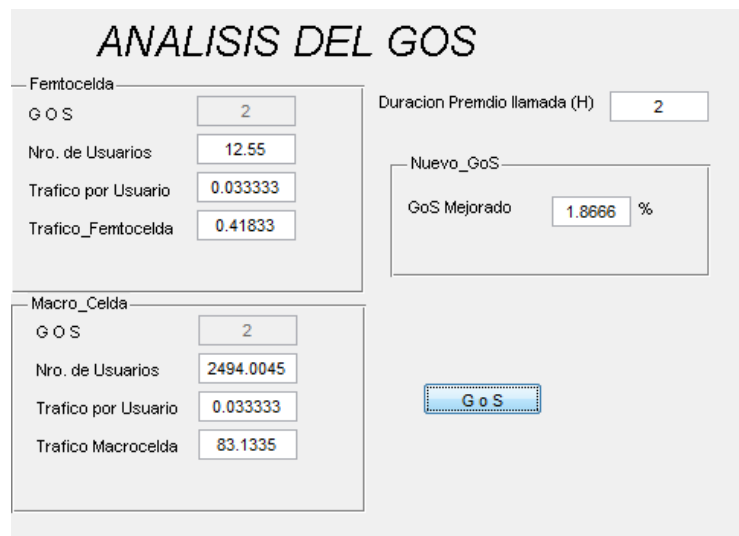


Figura 4. 35: Calculo del GoS, en una red macro-femtocelular

CAPITULO 5

5. ANALISIS COSTO – BENEFICIO DE LA IMPLEMENTACION DE FEMTOCELDAS

La implementación de femtoceldas, visto en el apartado 4.5, tiene una mejora en la capacidad y en la calidad, parámetros indispensables en una transmisión inalámbrica, los cuales indican que la implementación de femtoceldas, en un aspecto técnico, tiene las ventajas suficientes como para adoptarlo.

En este capítulo se realizara un análisis económico, en el caso de implementar un sistema femtocelular en el Ecuador, para lo que es necesario determinar una posible acogida de esta nueva forma de acceder a un sistema celular con las respectivas bondades que este ofrece.

5.1 COSTO DE LA IMPLEMENTACION DE FEMTOCELDAS

5.1.1 MATERIALES Y EQUIPOS.

En el proceso de mejorar la calidad de un servicio celular usando femtoceldas, es necesario analizar diversas opciones existentes en el mercado con el fin de tener un equipo que se acople a las necesidades, la Tabla 5.2 muestra diversas femtoceldas, las cuales pueden ser adquiridas por un operador móvil, con el fin de mejorar las calidad del servicio ofrecido.

Tabla 5. 1: Equipos Femtocelda

Marca	Modelo	Precio	Características
Alcatel Lucent	Home Cell 9361 v2	\$ 170,00	Banda 850 - 1900 MHz, potencia de 20/100 mW, Capacidad de 8 usuarios
Alcatel Lucent	Enterprise Cell 9362	\$ 270,00	Banda de 850 - 1900 MHz, potencia 100 / 250 mW, Capacidad de 16 Usuarios
Alcatel Lucent	Enterprise Cell 9361	\$ 250,00	Banda de 850 - 1900 MHz potencia de 200/250 mW Capacidad de 16 usuarios
Alcatel Lucent	Indoor 9363	\$ 320,00	Banda de 850 - 1900 MHz, potencia 500 mW, Capacidad de 16 Usuarios, radio de cobertura 50
CISCO	3G microcell	\$ 300,00	Banda de 850 - 1900 MHz, Capacidad de 16 usuarios.
Samsung	SCS-2U01	\$ 350,00	Banda 695 - 3750 MHZ, potencia de 10 dBi, 16 Usuarios.
Samsung	SCS-26UC4	\$ 220,00	Banda de 800 - 1900 MHz, potencia de 10/30 mW, radio de cobertura 20m,

Huawei	BTS	\$ 270,00	Banda GSM 850 - 1900 or dual, Potencia de salida 200mW, Radio de Cobertura 70m, Trafico 5mE, Soporta 8Usuarios de voz y 2 de datos simultáneamente, o 12 Usuarios de voz
--------	-----	-----------	--

Para el análisis financiero, se hace un supuesto en el proceso de la mejora de la calidad, hacer uso de la femtocelda Enterprise Cell 9361 (ver Figura 5.1), misma que brinda tiene capacidad para 16 usuarios en su área de cobertura.



Figura 5. 1 Femtocelda Enterprise Cell 9361, Alcatel Lucent.

- **Cable para Conexión**

Para la instalación entre la Femtocelda y un Modem, se ha considerado no superar una distancia de 30 metros, y a la vez un cable UTP cat 5e.

- **Materiales**

Los materiales extras que se pueden considerar en la conexión de una femtocelda, y a la vez considerados en un análisis económico, tales como: conector RJ-45, cable extra, herramientas adicionales.

- **Mano de Obra**

Para el personal que realice la instalación, se prevé hacer por contrato.

5.1.2 ESTIMACION DE LA INVERSION

En el Ecuador existe alrededor de 180000 empresas, para el análisis financiero se hace un supuesto que el 5% de estas empresas tienen mala cobertura celular, es decir 9000 empresas.

Si por empresa existe 20 supuestos usuarios, que pueden cambiarse a la operadora que pretende mejorar la calidad, debido a que la femtocelda en estudio tiene capacidad para 16 Usuarios, es necesario implementar 2 femtoceldas por empresa, por lo que suman 18000 femtoceldas instaladas para mejorar la calidad del servicio que ofrecen dichas operadoras móviles; se ha considerado adquirir un 10% de equipos adicionales, por el hecho de: mala manipulación en el equipo, el caso de que se necesiten más equipos para instalar o daño en el transporte

Tabla 5. 2: Estimación de la Inversión

Descrpicion	Cantidad	Valor por Unidad	Valor Total
Equipo Femtocelda Enterprise Cell 9361	19800	\$ 250,00	\$ 4.950.000,00
Cable UTP Cat. 5e	180000	\$ 0,30	\$ 54.000,00
Varios	18000	\$ 5,00	\$ 90.000,00
Tecnico Instalador	18000	\$ 20,00	\$ 360.000,00
Total			\$ 5.454.000,00

(* Datos Supuestos)

Las consideraciones realizadas en la estimación de la inversión son:

- 19800 femtoceldas, 18000 para ser instaladas más un 10% adicionales debido a posibles daños en las mismas.
- Cable UTP, 180000 metros de cable debido a que por equipo instalado se va a usar 10 metros de cable.
- Técnico Instalador, es la persona que se va a encargar de ir a la empresa donde se desea mejorar la calidad y realizar la instalación.
- Varios, este ítem hace referencia a conectores RJ-45, posible uso extra de cable.

5.1.3 ESTIMACION DE COSTO POR LLAMADAS e INGRESOS

En la telefonía móvil se considera un GoS del 2% lo que quiere decir que de cada 100 llamadas no se completan 2. Estas llamadas no cursadas representan pérdidas para la operadora móvil, por lo cual es necesario tratar de reducir el GoS.

Es por esta razón que se analizara como se reduce las pérdidas económicas al mejorar la calidad, haciendo una comparación entre las pérdidas producidas en una macrocelda versus una red macro-femtocelda al no facturar las llamadas perdidas.

En los cálculos realizados para una macrocelda se tiene un total de 2494 usuarios, si cada usuario hace en promedio de 3 llamadas diarias con una duración 2 minutos cada una se obtiene los siguientes valores mostrados en la Tabla 5.3.

Tabla 5. 3: Tabla de las llamadas cursadas en una Macro celdas

Total Usuarios	No. Llamadas/Usu	Total Llamadas	Duración media llamada (min)	Duración Total Llamadas (min)
2494	3	7482	2	14964

La tarifa considerada es de 18 centavos de dólar por minuto en on net, dando como resultado un total de \$ 2693,52 dólares de facturar si se completaran en total las 7.482 llamadas diarias.

Debido al GoS del 2% de las 7482 llamadas realizadas, 7332 son las cursadas en la macrocelda, teniendo un total de 150 llamadas que se pierden, facturando un valor de \$ 2639,65 y produciendo una pérdida de 53,87 dólares por día.

5.1.3.1 Costos por llamada en una femtocelda..

El análisis técnico realizado en el Capítulo 4, demuestra que la mejora de calidad de un servicio de 2 a 1,86%, si por empresa con 20 usuarios de telefonía móvil se instala una femtocelda, y cada usuario realiza 3 llamadas por día con una duración de 2 minutos cada llamada, la empresa tiene un ingreso indicado en la Tabla 5.4.

Tabla 5. 4: Ingreso generado por día de una femtocelda

GoS	Nro. Usuarios	Nro. Llamadas	Duración Llamada (min)	Costo por minuto	Total Llamadas	Costo Total
1,86%	20	3	2	\$ 0,18	58,884	\$ 21,20

Al tener una red macro-femtocelda se obtienes los valores mostrados en la Tabla 5.5, que indican los ingresos por día.

Tabla 5. 5: Ingreso generado por día del Sistema Macro- femtocelda

Total Llamadas/Cursadas (Macro)	Total Llamadas/Cursadas (Femto)	Duración Total Llamadas (min)	Costo Total
7.332,36	58,88	14.782,49	\$ 2.660,85

Se puede realizar una comparación de los valores monetarios que se pierden en el sistema macro celda versus el sistema macro-femtocelda por día.

Tabla 5. 6: Tabla comparativa de Perdidas por llamadas no cursadas de una Red Macro vs. Red Macro- femtocelda

	Costo Total/min (\$)	Perdidas por llamadas no cursadas (\$)
Red macro sin perdidas de llamadas	\$ 2.693,52	-
Red Macro Gos 2%	\$ 2.639,65	\$ 53,87
Red Macro-Femto	\$ 2.660,85	\$ 32,67

Las pérdidas son menores debido al incremento del tráfico cursado al adicionar la femtocelda disminuyendo de \$ 53,87 a \$ 32,67.

Si en el Ecuador se implementa el sistema femtocelular para el 5% de Empresas que no tienen buena cobertura celular (datos supuestos), serian 9000 empresas con 20 usuarios cada una, dando como resultado 180000 femto-usuarios.

Tabla 5. 7: Ingreso generado por día de 18000 femtoceldas

GoS	Nro. Usuarios	Nro. Llamadas	Duración Llamada (min)	Costo por minuto	Total Llamadas	Costo Total
1,86%	180000	3	2	\$ 0,18	529956	\$190.784,16

Como se puede observar en la Tabla 5.7 los ingresos diarios que generan los 180000 usuarios femtocelda son de \$ 190.784,16 dólares por día.

5.1.4 RECUPERACION DE LA INVERSION

Para la recuperación de la inversión, se realiza énfasis en los resultados mostrados en el apartado 5.1.3.

Al tener un ingreso diario de \$195.392,08, indica que al mes tiene un ingreso económico de \$ 5'723.524,80 lo cual da un periodo de 29 días en el que se recupera la inversión.

5.2 BENEFICIOS GENERADOS PARA EL USUARIO COMO PARA EL OPERADOR MOVIL

Los beneficios generados, al hablar de términos económicos, tanto para los usuarios como para los operadores móviles son:

5.2.1 BENEFICIOS PARA EL USUARIO

El usuario móvil, no tendría que invertir dinero en la implementación de femtoceldas, ya que el servicio brindado por el operador móvil, no tiene por qué ser

pagado por el usuario, ya que es el servicio que un operador móvil debe ofertar para sus clientes. El mayor beneficio que consigue el usuario es el de obtener una mejor calidad en el servicio.

5.2.2 BENEFICIOS PARA EL OPERADOR MOVIL

El operador móvil al realizar una inversión en la implementación de femtoceldas, consigue brindar un mejor servicio a sus clientes, y una gran probabilidad de captar clientes nuevos, logrando mayores ingresos económicos.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS

La implementación de esta tecnología, trae consigo una serie de ventajas y desventajas, las cuales son expuestas en el siguiente apartado.

VENTAJAS

a) POR PARTE DE UN OPERADOR MOVIL

La implementación de femtoceldas en la red de un operador móvil tiene consigo ventajas como:

- Mejora el área de cobertura: al hablar de zonas en donde la cobertura es nula, la implementación de femtoceldas permite incrementar el área de cobertura de una operadora móvil.
- Mejora del GoS: las entidades de control, como la SUPERTEL en ECUADOR, con frecuencia realizan pruebas a manera de comprobar que el GoS de un sistema celular no baje del 2%, al implementar un sistema femtocelular, el GoS mejora de un 2% a un 1,86%, dando como resultado una mayor calidad en el servicio ofrecido.
- Bajo costo de instalación: en comparación al costo de instalación de una estación base para una red macro, la femtocelda tiene un costo muy económico para la operadora ya que su valor de instalación no sobrepasa los 400 dólares.
- No se necesita de terminales especiales: ya que es una estación base el usuario solo necesita que su terminal móvil sea de tecnología 3G para poder hacer uso de la femtocelda.
- Mayor número de usuarios: al implementarse las femtoceldas el número de usuarios servidos en la zona cubierta por la red macro incrementa debido a que cierto número de usuarios serán servidos por la femtocelda liberando capacidad para servir a otros usuarios macro.

- Uso más eficiente del espectro radioeléctrico: debido a que las femtoceldas pueden trabajar en las mismas bandas de frecuencias de las macro-celdas ya que las interferencias co-canal como canal adyacente afecta en una mínima cantidad se puede hacer uso más eficiente del escaso espectro radio eléctrico.

b) POR PARTE DE UN USUARIO

Al introducir las femtoceldas, las ventajas que tiene un usuario son:

- Mejor calidad: El usuario puede disponer de una mejor calidad en su servicio de voz, datos o multimedia, ya que puede tener una mayor tasa de datos.
- Mejora la duración de la batería: La rápida descarga de las baterías, es uno de las grandes limitaciones de los operadores móviles al querer brindar altas tasas de datos a los usuarios. La distancia entre el UE, y una Femtocelda es corta, en comparación con la distancia entre un macro usuario y una macrocelda, al ser corta esta distancia, la potencia de transmisión en uplink es reducida, lo que indica que las baterías de los UE's duraran más.
- Grupo selecto de uso de una Femtocelda: El disponer de una femtocelda, permite crear un selecto grupo que pueda acceder al sistema celular mediante el uso de una femtocelda, de manera que tiene su ancho de banda reservado solo para el grupo.

DESVENTAJAS

- Limitado número de usuarios: la femtocelda puede servir solo a un determinado número de usuarios, siendo necesario la instalación de otra femtocelda en el caso de tener una mayor demanda de usuarios.
- Corta distancia de cobertura: debido a las interferencias tanto co-canal como canal adyacente, y para garantizar su adecuado funcionamiento, la femtocelda puede cubrir distancias cortas que no sobrepasen los 100m.
- Potencia reducida: al ser un equipo pequeño, controla poca potencia en la transmisión de datos, esta potencia pequeña es también un limitante del área de cobertura.

- Dependencia de una conexión ADSL: debido a que las femtoceldas necesitan básicamente de una conexión de banda ancha como ADSL son vulnerables a dejar de funcionar en caso que la conexión de banda ancha fallase.
- Posibles agujeros: al usar la misma frecuencia, se genera interferencia co-canal, y es probable que esta interferencia genere problemas en la operación de una macrocelda, generando agujeros de cobertura.
- Compromete la capacidad: al no tener una interferencia controlada, la capacidad de una macrocelda se puede ver afectada.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

La capacidad de los operadores móviles se ve limitada debido a la alta demanda de usuarios, por lo que se propone implementar FEMTOCELDAS, con el fin de dar solución a esta problemática sin comprometer la calidad del servicio brindado.

Se ha realizado el cálculo de la capacidad para ver la mejora en el sistema macro-femtocelda al brindar un servicio de voz y datos, el análisis está enfocado en diferentes escenarios propuestos considerando las interferencias presentes en cada uno como son la co-canal y de canal adyacente.

Para el cálculo de las pérdidas en ambientes indoor, se utilizó el modelo multi-pared ya que considera las pérdidas producidas por diferentes factores como son: el número de paredes que intervienen, el número de plantas y el material con el que están contruidos; para ambientes outdoor se utilizó el modelo Hata-Cost 231. Las pérdidas calculadas con los diferentes modelos de propagación son fundamentales ya que permiten el cálculo de la capacidad de las interferencias las que a su vez conlleva al cálculo de la capacidad, Apartado 4.

Para cada escenario se ha considerado un número fijo de usuarios que van a hacer uso del servicio de Datos, estos usuarios son tomados en cuenta al momento de calcular la capacidad para el servicio combinado cuyo valor es igual a la mitad de usuarios calculados que hagan uso solo de dicho servicio.

En el Escenario1 al tratarse de un enlace ascendente con canal dedicado y una femtocelda sirviendo a un inmueble de 3 plantas, se tiene presente únicamente la interferencia intracelular, misma que es producida por usuarios pertenecientes a la misma femtocelda. Los valores de capacidad obtenidos para un GoS del 2% son: voz 64,48, datos 14,93 y en un servicio combinado al tener 7 usuarios de datos se obtuvo 9,21 usuarios de voz.

En el escenario 2 al incrementarse una femtocelda más para cubrir el área de servicio de un inmueble de 6 plantas se puede observar que la capacidad de cada uno

de los servicios se ve disminuida en comparación al Escenario 1, teniendo una capacidad de voz de 62,47; de datos de 14,42 y combinado de 9,13 de voz y 7 de datos; esto es debido a que en los cálculos se debe considerar a más de la interferencia intracelular la interferencia intercelular producida por la segunda femtocelda.

Los escenarios 3 y 4 son iguales a los escenarios 1 y 2 respectivamente con la única diferencia que el análisis realizado es para un enlace Downlink. Los valores de capacidad en el escenario 3 es de 189,57 para usuarios de voz, 39,11 para datos y para un servicio combinado se tiene 9,02 de voz con 20 usuarios de datos.

En el escenario 4 los valores calculados fueron de 174,56 para usuarios de voz, 33,98 para datos y para un servicio combinado se tiene 10,4 de voz con 16 usuarios de datos.

Las capacidades de los escenarios en downlink son mayores en comparación con las de uplink debido a que la interferencia intracelular e intercelular no llega a ser tan elevada como para tener una capacidad limitada por interferencia. Por eso el factor limitante será el número máximo de códigos que se puede asignar a cada servicio (32 para datos y 256 para voz).

Lo más importante que se debe considerar para la implementación de las femtoceldas es un análisis en un ambiente asemejado a la realidad, que es la convivencia entre las femtoceldas con la red macrocelular, es decir considerando la posible interferencia co-canal producida al compartir las frecuencias.

El Escenario 5 consiste en una red formada por el escenario 1 pero esta vez se debe tomar en cuenta la presencia de la macro celda más cercana así como de sus respectivos usuarios. De los valores calculados se obtuvo una capacidad de 64,2 para usuarios de voz; 14,07 para datos y para un servicio combinado se tiene 9,18 para voz considerando 7 usuarios de datos, a la presencia de 4 usuarios macrocelda que están haciendo uso de la red macro. Si se realiza una comparación entre la capacidad del Escenario 1 y del 5 los valores no varían casi nada esto es debido a que la interferencia producida por los usuarios macroceldas no afecta en gran proporción a la femtocelda ya que se consideró que los usuarios macrocelda están localizados a

una distancia de 10 m de la edificación donde se encuentra la femtocelda y la señal interferente por parte del macro usuario se va a atenuar al tener que atravesar los diferentes obstáculos presentes en el inmueble donde se encuentra ubicada la femtocelda. De igual forma el escenario 6 es similar al 5 pero teniendo en cuenta que se va a servir a un inmueble de 6 plantas con 2 femtoceldas similar al escenario 2.

De igual forma los valores calculados de la capacidad tanto de voz como para datos fue de 6169 y 12,55 respectivamente y para un servicio combinado teniendo en cuenta 6 usuarios de datos y 4 usuarios macrocelda fueron de 9,82 usuarios de voz. De igual forma que el escenario 5 los valores de capacidad disminuyen poco debido al mismo efecto provocado por los usuarios macro.

Para el análisis de ambientes en downlink con canal compartido, se ha realizado el análisis simulando ambientes tal cual el Escenario 7 (Figura 4.26), y el Escenario 8 (Figura 4.30). El escenario 7 cuenta entre sus interferencias la interferencia macrocelular e intracelular, lo cual permite una capacidad de 19,16 usuarios de datos, 93 usuarios de voz, y 10 usuarios de voz con 8 usuarios de datos, estos valores fueron calculados al tener una macrocelda provocando la interferencia. Mientras que el Escenario 8 se añade una interferencia intercelular, arrojando resultados de: 68 usuarios de voz, 13 usuarios de datos y 10 usuarios de voz con 6 de datos, de igual manera considerando 1 macrocelda interferente.

Las interferencias provocadas ya sea por usuarios de la misma femtocelda, otra femtocelda o por una macrocelda, provocan que los usuarios disminuyan debido a que la capacidad es inversamente proporcional a la ganancia de procesamiento según el servicio brindado por la suma del ruido existente en la red y de las diferentes interferencias (Ec 4.17). Los valores de capacidad no varían de manera abrupta ya que los niveles de interferencia son muy bajos en comparación al margen del enlace, ya que la esperanza y la varianza calculada para cada servicio son pequeños.

La mejora de la capacidad no debe comprometer la calidad del operador móvil, que por lo general en nuestro medio es de un QoS del 2%, por lo que en el software se ha considerado este factor calculado la capacidad de una macrocelda, con el fin de determinar el tráfico de la macrocelda y poder restar el tráfico que cursa por una femtocelda; la capacidad de una macrocelda es de 2494, este valor da un tráfico de

83,133 E, y un tráfico de 0,033 E por usuario. Se ha considerado el escenario con el número más bajo de usuarios ya que es el peor de los casos, este valor es de 12 usuarios los mismo que libera la femtocelda del área de cobertura de la macrocelda, el tráfico que este libera de la red macro es de 0,4183 E, dándonos una mejora en el GoS del 2% a 1,866%.

Con respecto al análisis financiero, este es un punto más a favor en el caso de la posible implementación de femtoceldas, ya que la recuperación de la inversión es inmediata, considerando los datos supuestos de usuarios.

La implementación de femtoceldas, desde los diferentes puntos de vista analizados anteriormente, demuestra que es un proyecto viable ya que las ventajas son numerosas en comparación al tener que implementar macroceldas para aumentar la capacidad y brindar mayor cobertura en zonas muertas, sin tener que comprometer la calidad.

RECOMENDACIONES

En el caso de llegarse a darse la implementación de femtoceldas, se recomienda por parte del operador móvil proponer, a las empresas beneficiadas con la instalación de femtoceldas, planes corporativos a bajo costo de manera que sea accesible para los empleados y así abarcar mayor cantidad de usuarios y así recuperar la inversión. Se ha planteado como una alternativa un plan celular cuyo costo sea de \$15,00 USD, el cual contempla 1000Mb de datos y 100 minutos de tiempo aire.

Debido a que las antenas de las femtoceldas son omnidireccionales, se recomienda ubicar la misma en el centro de la edificación, con el fin de garantizar una cobertura uniforme a lo largo del inmueble.

Para un correcto funcionamiento si se requiere utilizar más de una femtocelda por inmueble, es recomendado ubicar a una distancia no menor de 15 metros, así se garantiza la eficiencia en el funcionamiento de los mismos.

La operadora ofertante de este sistema, no debe de intentar cobrar a los usuarios, ya que en España se intentó cobrar en un plan mensual el valor de la femtocelda, lo cual no tuvo mucha acogida y dicha empresa empezó a perder usuarios.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Francesc Comellas and Javier Ozon. Sistemas Multiagente para la Asignacion de Frecuencias en redes Celulares. [Online]. <http://www-ma4.upc.edu/~comellas/telecomid/338-paper.pdf>
- [2] S Ocaña. (2002, Mayo) Telefonía Celular Funcionamiento y Generacion. [Online]. <http://imagenes.mailxmail.com/cursos/pdf/7/telefonía-celular-movil-funcionamiento-generaciones-24457.pdf>
- [3] Edgar Efrain Ochoa, *Wirelss Networks*. Cuenca, Ecuador, 2011.
- [4] Ramon Agusti Comes, "Sistemas de Comunicaciones Moviles," Diciembre 1996.
- [5] Leon W. Couch, *Sistemas de comunicacion Analogicos y Digitales*, Septima ed. Mexico: Pearson, 2008.
- [6] Aitor Satostegui Oses and Francisco Javier Falcone Lanás. (2012, Junio) COMPORTAMIENTO DE COBERTURA/CAPACIDAD EN ENTORNOS INTERIORES FEMTOCELULARES. [Online]. <http://academica-e.unavarra.es/handle/2454/5741>
- [7] Paola Burneo and Patricio Siguenza. (Junio, 2012) Evolucion del Sistema Celular hacia UMTS. [Online]. www.researchgate.net/profile/d912f51245fc96e915.pdf
- [8] Maritza Cecibel Chimbo Rodriguez. (2012) Analisis de la Propuesta de Evolucion de redes 3g y su convergencia a la Tecnología 4g para redes de telefonía Movil. [Online]. <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2072/13/UPS-CT002379.pdf>
- [9] Varios. LTE la cuarta generacion. [Online]. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11983/fichero/Cap%EDtulo+2+-+LTE.pdf>
- [10] Alvaro Pachon de la Cruz. (2004, Octubre) Evolucion de los Sistemas Moviles Celulares GSM. [Online]. https://www.icesi.edu.co/revistas/index.php/sistemas_telematica/article/viewFile/942/967
- [11] Miguel Maria Rodriguez Aparicio. (2011, Enero) Pasado, Presente y Futuro de la Itinerancia en las Comunicaciones Moviles. [Online]. <http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/12409>

- [12] Karina Muñoz V., Ramon Lara, and Ruben Leon. Analisis de la tecnologia Long Term Evolution (LTE) para su posible implementacion en el Ecuador. [Online]. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/4700>
- [13] Renzo Mare. (2003) Introduccion a la Telefonía Celular. [Online]. <http://msanchez.usach.cl/lcc/introtelefoniacelular.pdf>
- [14] Roberto Andres Roca Rojas. (2013) Evaluacion de las Características y Ventajas que ofrecen las Femtoceldas dentro de una red multiservicios de 3G de Telefonía Movil. [Online]. <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6198/1/AC-TEL-ESPE-038896.pdf>
- [15] Jie Zhang and Guillaume de la Roche, *FEMTOCELLS Technologies and Deployments*. Chichester, United Kingdom, 2010.
- [16] Volkan Sevindik. Traffic classification and resource management in Femtocell Network. [Online]. <http://www.ibwave.com/blog/wp-content/uploads/2012/01/RadioResourceManagementInFemtocellNetworks2.pdf>
- [17] Xuss Catala. (2010, Junio) Vodafone Introduce las femtoceldas en España. [Online]. <http://www.xuss.es/2010/06/vodafone-introduce-las-femtoceldas-en-espana-por-15-e-al-mes/>
- [18] Alcatel-Lucent TIM. (2014, Febrero) TIM cierra un acuerdo de femtoceldas con Alcatel-Lucent. [Online]. <http://www.prnewswire.com/news-releases/tim-cierra-un-acuerdo-de-femtoceldas-con-alcatel-lucent-247231801.html>
- [19] Anonimo. (2014, Febrero) TIM Brasil alcanza acuerdo con Alcatel-Lucent. [Online]. <https://es-us.finanzas.yahoo.com/noticias/mwc-2014-tim-brasil-alcanza-185700748.html>
- [20] Juan Carlos Mamani Limachi, *Mejoramiento y optimización de la red rural móvil utilizando*. Lima, Peru, 2012.
- [21] Manuel Ballester Lidon, *Aplicacion del modelo de propagacion Multi-Wall para la estimacion de cobertura de femtoceldas LTE en Interiores*. VALENCIA.
- [22] Daniel Alejandro Campos Velasquez. (2004) Coleccion de Tesis Digitale de la UAP. [Online]. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/campos_v_da/capitulo_4.html

- [23] Marta Anaya de Paz, *FEMTOCELDAS DE UMTS*. Madrid, España: UAM, 2012.
- [24] Anonimo. Estudio De Coberturas. Tecnologías Y Parámetros Técnicos De La Simulación. [Online]. <http://www.tenerife.es/planes/PTEOTelecomunicaciones/adjuntos/A2-001.pdf>
- [25] Maximo Morales Cespedes. (2010, Octubre) Gestion de Interferencias en Sistemas Femtocelda. [Online]. http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10846/PFC_Maximo_Morales_Cespedes.pdf?sequence=1
- [26] Harri Holma and Antti Toskala, *WCDMA FOR UMTS- HSPA evolution and LTE*, 4th ed. Chichester, England: WILEY, 2007.
- [27] R.S. Kshetrimayum. Advanced Topics in Communications Systems. [Online]. http://www.iitg.ernet.in/engfac/krs/public_html/lectures/ee635/A3.pdf
- [28] Vikram Chandrasekhar and Jeffrey G. Andrews. (2008, September) Topics in Radio Communications. [Online]. http://www.hit.bme.hu/~jakab/edu/litr/UMTS_HBS/FC.PDF
- [29] Juan Miguel Aguado. (2006, Enero) El proceso de mediatiazacion de la telefonia movil. [Online]. <http://www.ehu.es/zer/hemeroteca/pdfs/zer20-15-aguado.pdf>
- [30] Varios. Sistemas de Comunicaciones Moviles. [Online]. <http://infotelecommil.webcindario.com/librostelecom/Sistemas%20de%20Comunicaciones%20Moviles.pdf>
- [31] Wajih Abu Al Saud. Frequency Reuse Concepts. [Online]. <http://faculty.kfupm.edu.sa/EE/wajih/files/EE%20499,%20Lecture%2010.pdf>
- [32] Anonimo. Cellular Technologies. [Online]. <https://www.eff.org/files/filenode/Cellular%20Technology.pdf>
- [33] Jose Manuel Huidobro. (2009, Junio) Femtoceldas, una solución de Futuro. [Online]. http://coitt.es/res/revistas/15_Telefonia_MN3.pdf

ANEXOS

ANEXO 1 ERLANG B

(Blocked Calls Cleared)

$$P = \frac{\frac{A^N}{N!}}{\sum_{x=0}^N \frac{A^x}{x!}}$$

No. of Trunks (N)	Traffic (A) in erlangs for P =																
	0,1%	0,2%	0,5%	1%	1,2%	1,3%	1,5%	2%	3%	5%	7%	10%	15%	20%	30%	40%	50%
1	0,001	0,002	0,005	0,010	0,012	0,013	0,02	0,020	0,031	0,053	0,075	0,111	0,176	0,250	0,429	0,667	1,00
2	0,046	0,065	0,105	0,153	0,168	0,176	0,19	0,223	0,282	0,381	0,470	0,595	0,796	1,00	1,45	2,00	2,73
3	0,194	0,249	0,349	0,455	0,489	0,505	0,53	0,602	0,715	0,899	1,06	1,27	1,60	1,93	2,63	3,48	4,59
4	0,439	0,535	0,701	0,869	0,922	0,946	0,99	1,09	1,26	1,52	1,75	2,05	2,50	2,95	3,89	5,02	6,50
5	0,762	0,900	1,13	1,36	1,43	1,46	1,52	1,66	1,88	2,22	2,50	2,88	3,45	4,01	5,19	6,60	8,44
6	1,15	1,33	1,62	1,91	2,00	2,04	2,11	2,28	2,54	2,96	3,30	3,76	4,44	5,11	6,51	8,19	10,4
7	1,58	1,80	2,16	2,50	2,60	2,65	2,73	2,94	3,25	3,74	4,14	4,67	5,46	6,23	7,86	9,80	12,4
8	2,05	2,31	2,73	3,13	3,25	3,30	3,40	3,63	3,99	4,54	5,00	5,60	6,50	7,37	9,21	11,4	14,3
9	2,56	2,85	3,33	3,78	3,92	3,98	4,08	4,34	4,75	5,37	5,88	6,55	7,55	8,52	10,6	13,0	16,3
10	3,09	3,43	3,96	4,46	4,61	4,68	4,80	5,08	5,53	6,22	6,78	7,51	8,62	9,68	12,0	14,7	18,3
11	3,65	4,02	4,61	5,16	5,32	5,40	5,53	5,84	6,33	7,08	7,69	8,49	9,69	10,9	13,3	16,3	20,3
12	4,23	4,64	5,28	5,88	6,05	6,14	6,27	6,61	7,14	7,95	8,61	9,47	10,8	12,0	14,7	18,0	22,2
13	4,83	5,27	5,96	6,61	6,80	6,89	7,03	7,40	7,97	8,83	9,54	10,5	11,9	13,2	16,1	19,6	24,2
14	5,45	5,92	6,66	7,35	7,56	7,65	7,81	8,20	8,80	9,73	10,5	11,5	13,0	14,4	17,5	21,2	26,2
15	6,08	6,58	7,38	8,11	8,33	8,43	8,59	9,01	9,65	10,6	11,4	12,5	14,1	15,6	18,9	22,9	28,2
16	6,72	7,26	8,10	8,88	9,11	9,21	9,39	9,83	10,5	11,5	12,4	13,5	15,2	16,8	20,3	24,5	30,2
17	7,38	7,95	8,83	9,65	9,89	10,0	10,19	10,7	11,4	12,5	13,4	14,5	16,3	18,0	21,7	26,2	32,2
18	8,05	8,64	9,58	10,4	10,7	10,8	11,00	11,5	12,2	13,4	14,3	15,5	17,4	19,2	23,1	27,8	34,2
19	8,72	9,35	10,3	11,2	11,5	11,6	11,82	12,3	13,1	14,3	15,3	16,6	18,5	20,4	24,5	29,5	36,2
20	9,41	10,1	11,1	12,0	12,3	12,4	12,65	13,2	14,0	15,2	16,3	17,6	19,6	21,6	25,9	31,2	38,2
21	10,1	10,8	11,9	12,8	13,1	13,3	13,48	14,0	14,9	16,2	17,3	18,7	20,8	22,8	27,3	32,8	40,2
22	10,8	11,5	12,6	13,7	14,0	14,1	14,32	14,9	15,8	17,1	18,2	19,7	21,9	24,1	28,7	34,5	42,1
23	11,5	12,3	13,4	14,5	14,8	14,9	15,16	15,8	16,7	18,1	19,2	20,7	23,0	25,3	30,1	36,1	44,1
24	12,2	13,0	14,2	15,3	15,6	15,8	16,01	16,6	17,6	19,0	20,2	21,8	24,2	26,5	31,6	37,8	46,1
25	13,0	13,8	15,0	16,1	16,5	16,6	16,87	17,5	18,5	20,0	21,2	22,8	25,3	27,7	33,0	39,4	48,1
26	13,7	14,5	15,8	17,0	17,3	17,5	17,72	18,4	19,4	20,9	22,2	23,9	26,4	28,9	34,4	41,1	50,1
27	14,4	15,3	16,6	17,8	18,2	18,3	18,59	19,3	20,3	21,9	23,2	24,9	27,6	30,2	35,8	42,8	52,1
28	15,2	16,1	17,4	18,6	19,0	19,2	19,45	20,2	21,2	22,9	24,2	26,0	28,7	31,4	37,2	44,4	54,1
29	15,9	16,8	18,2	19,5	19,9	20,0	20,32	21,0	22,1	23,8	25,2	27,1	29,9	32,6	38,6	46,1	56,1
30	16,7	17,6	19,0	20,3	20,7	20,9	21,19	21,9	23,1	24,8	26,2	28,1	31,0	33,8	40,0	47,7	58,1
31	17,4	18,4	19,9	21,2	21,6	21,8	22,07	22,8	24,0	25,8	27,2	29,2	32,1	35,1	41,5	49,4	60,1
32	18,2	19,2	20,7	22,0	22,5	22,6	22,95	23,7	24,9	26,7	28,2	30,2	33,3	36,3	42,9	51,1	62,1
33	19,0	20,0	21,5	22,9	23,3	23,5	23,83	24,6	25,8	27,7	29,3	31,3	34,4	37,5	44,3	52,7	64,1
34	19,7	20,8	22,3	23,8	24,2	24,4	24,72	25,5	26,8	28,7	30,3	32,4	35,6	38,8	45,7	54,4	66,1
35	20,5	21,6	23,2	24,6	25,1	25,3	25,60	26,4	27,7	29,7	31,3	33,4	36,7	40,0	47,1	56,0	68,1
36	21,3	22,4	24,0	25,5	26,0	26,2	26,49	27,3	28,6	30,7	32,3	34,5	37,9	41,2	48,6	57,7	70,1

37	22,1	23,2	24,8	26,4	26,8	27,0	27,39	28,3	29,6	31,6	33,3	35,6	39,0	42,4	50,0	59,4	72,1
38	22,9	24,0	25,7	27,3	27,7	27,9	28,28	29,2	30,5	32,6	34,4	36,6	40,2	43,7	51,4	61,0	74,1
39	23,7	24,8	26,5	28,1	28,6	28,8	29,18	30,1	31,5	33,6	35,4	37,7	41,3	44,9	52,8	62,7	76,1
40	24,4	25,6	27,4	29,0	29,5	29,7	30,08	31,0	32,4	34,6	36,4	38,8	42,5	46,1	54,2	64,4	78,1
41	25,2	26,4	28,2	29,9	30,4	30,6	30,98	31,9	33,4	35,6	37,4	39,9	43,6	47,4	55,7	66,0	80,1
42	26,0	27,2	29,1	30,8	31,3	31,5	31,88	32,8	34,3	36,6	38,4	40,9	44,8	48,6	57,1	67,7	82,1
43	26,8	28,1	29,9	31,7	32,2	32,4	32,79	33,8	35,3	37,6	39,5	42,0	45,9	49,9	58,5	69,3	84,1
44	27,6	28,9	30,8	32,5	33,1	33,3	33,69	34,7	36,2	38,6	40,5	43,1	47,1	51,1	59,9	71,0	86,1
45	28,4	29,7	31,7	33,4	34,0	34,2	34,60	35,6	37,2	39,6	41,5	44,2	48,2	52,3	61,3	72,7	88,1
46	29,3	30,5	32,5	34,3	34,9	35,1	35,51	36,5	38,1	40,5	42,6	45,2	49,4	53,6	62,8	74,3	90,1
47	30,1	31,4	33,4	35,2	35,8	36,0	36,42	37,5	39,1	41,5	43,6	46,3	50,6	54,8	64,2	76,0	92,1
48	30,9	32,2	34,2	36,1	36,7	36,9	37,34	38,4	40,0	42,5	44,6	47,4	51,7	56,0	65,6	77,7	94,1
49	31,7	33,0	35,1	37,0	37,6	37,8	38,25	39,3	41,0	43,5	45,7	48,5	52,9	57,3	67,0	79,3	96,1
50	32,5	33,9	36,0	37,9	38,5	38,7	39,17	40,3	41,9	44,5	46,7	49,6	54,0	58,5	68,5	81,0	98,1
51	33,3	34,7	36,9	38,8	39,4	39,6	40,08	41,2	42,9	45,5	47,7	50,6	55,2	59,7	69,9	82,7	100,1
52	34,2	35,6	37,7	39,7	40,3	40,6	41,00	42,1	43,9	46,5	48,8	51,7	56,3	61,0	71,3	84,3	102,1
53	35,0	36,4	38,6	40,6	41,2	41,5	41,92	43,1	44,8	47,5	49,8	52,8	57,5	62,2	72,7	86,0	104,1
54	35,8	37,2	39,5	41,5	42,1	42,4	42,84	44,0	45,8	48,5	50,8	53,9	58,7	63,5	74,2	87,6	106,1
55	36,6	38,1	40,4	42,4	43,0	43,3	43,77	44,9	46,7	49,5	51,9	55,0	59,8	64,7	75,6	89,3	108,1
56	37,5	38,9	41,2	43,3	43,9	44,2	44,69	45,9	47,7	50,5	52,9	56,1	61,0	65,9	77,0	91,0	110,1
57	38,3	39,8	42,1	44,2	44,8	45,1	45,62	46,8	48,7	51,5	53,9	57,1	62,1	67,2	78,4	92,6	112,1
58	39,1	40,6	43,0	45,1	45,8	46,1	46,54	47,8	49,6	52,6	55,0	58,2	63,3	68,4	79,8	94,3	114,1
59	40,0	41,5	43,9	46,0	46,7	47,0	47,47	48,7	50,6	53,6	56,0	59,3	64,5	69,7	81,3	96,0	116,1
60	40,8	42,4	44,8	46,9	47,6	47,9	48,40	49,6	51,6	54,6	57,1	60,4	65,6	70,9	82,7	97,6	118,1
61	41,6	43,2	45,6	47,9	48,5	48,8	49,33	50,6	52,5	55,6	58,1	61,5	66,8	72,1	84,1	99,3	120,1
62	42,5	44,1	46,5	48,8	49,4	49,7	50,26	51,5	53,5	56,6	59,1	62,6	68,0	73,4	85,5	101,0	122,1
63	43,3	44,9	47,4	49,7	50,4	50,7	51,19	52,5	54,5	57,7	60,2	63,7	69,1	74,6	87,0	102,6	124,1
64	44,2	45,8	48,3	50,6	51,3	51,6	52,12	53,4	55,4	58,6	61,2	64,8	70,3	75,9	88,4	104,3	126,1
65	45,0	46,6	49,2	51,5	52,2	52,5	53,05	54,4	56,4	59,6	62,3	65,8	71,4	77,1	89,8	106,0	128,1
66	45,8	47,5	50,1	52,4	53,1	53,5	53,99	55,3	57,4	60,6	63,3	66,9	72,6	78,3	91,2	107,6	130,1
67	46,7	48,4	51,0	53,4	54,1	54,4	54,92	56,3	58,4	61,6	64,4	68,0	73,8	79,6	92,7	109,3	132,1
68	47,5	49,2	51,9	54,3	55,0	55,3	55,86	57,2	59,3	62,6	65,4	69,1	74,9	80,8	94,1	111,0	134,1
69	48,4	50,1	52,8	55,2	55,9	56,2	56,79	58,2	60,3	63,7	66,4	70,2	76,1	82,1	95,5	112,6	136,1
70	49,2	51,0	53,7	56,1	56,8	57,2	57,73	59,1	61,3	64,7	67,5	71,3	77,3	83,3	96,9	114,3	138,1
71	50,1	51,8	54,6	57,0	57,8	58,1	58,67	60,1	62,3	65,7	68,5	72,4	78,4	84,6	98,4	115,9	140,1
72	50,9	52,7	55,5	58,0	58,7	59,0	59,61	61,0	63,2	66,7	69,6	73,5	79,6	85,8	99,8	117,6	142,1
73	51,8	53,6	56,4	58,9	59,6	60,0	60,55	62,0	64,2	67,7	70,6	74,6	80,8	87,0	101,2	119,3	144,1
74	52,7	54,5	57,3	59,8	60,6	60,9	61,49	62,9	65,2	68,7	71,7	75,6	81,9	88,3	102,7	120,9	146,1
75	53,5	55,3	58,2	60,7	61,5	61,8	62,43	63,9	66,2	69,7	72,7	76,7	83,1	89,5	104,1	122,6	148,0
76	54,4	56,2	59,1	61,7	62,4	62,8	63,37	64,9	67,2	70,8	73,8	77,8	84,2	90,8	105,5	124,3	150,0
77	55,2	57,1	60,0	62,6	63,4	63,7	64,32	65,8	68,1	71,8	74,8	78,9	85,4	92,0	106,9	125,9	152,0
78	56,1	58,0	60,9	63,5	64,3	64,7	65,26	66,8	69,1	72,8	75,9	80,0	86,6	93,3	108,4	127,6	154,0
79	56,9	58,8	61,8	64,4	65,2	65,6	66,20	67,7	70,1	73,8	76,9	81,1	87,7	94,5	109,8	129,3	156,0
80	57,8	59,7	62,7	65,4	66,2	66,5	67,15	68,7	71,1	74,8	78,0	82,2	88,9	95,7	111,2	130,9	158,0
81	58,7	60,6	63,6	66,3	67,1	67,5	68,09	69,6	72,1	75,8	79,0	83,3	90,1	97,0	112,6	132,6	160,0
82	59,5	61,5	64,5	67,2	68,0	68,4	69,04	70,6	73,0	76,9	80,1	84,4	91,2	98,2	114,1	134,3	162,0
83	60,4	62,4	65,4	68,2	69,0	69,4	69,99	71,6	74,0	77,9	81,1	85,5	92,4	99,5	115,5	135,9	164,0
84	61,3	63,2	66,3	69,1	69,9	70,3	70,93	72,5	75,0	78,9	82,2	86,6	93,6	100,7	116,9	137,6	166,0
85	62,1	64,1	67,2	70,0	70,9	71,2	71,88	73,5	76,0	79,9	83,2	87,7	94,7	102,0	118,3	139,3	168,0
86	63,0	65,0	68,1	70,9	71,8	72,2	72,83	74,5	77,0	80,9	84,3	88,8	95,9	103,2	119,8	140,9	170,0
87	63,9	65,9	69,0	71,9	72,7	73,1	73,78	75,4	78,0	82,0	85,3	89,9	97,1	104,5	121,2	142,6	172,0
88	64,7	66,8	69,9	72,8	73,7	74,1	74,73	76,4	78,9	83,0	86,4	91,0	98,2	105,7	122,6	144,3	174,0

89	65,6	67,7	70,8	73,7	74,6	75,0	75,68	77,3	79,9	84,0	87,4	92,1	99,4	106,9	124,0	145,9	176,0
90	66,5	68,6	71,8	74,7	75,6	76,0	76,63	78,3	80,9	85,0	88,5	93,1	100,6	108,2	125,5	147,6	178,0
91	67,4	69,4	72,7	75,6	76,5	76,9	77,58	79,3	81,9	86,0	89,5	94,2	101,7	109,4	126,9	149,3	180,0
92	68,2	70,3	73,6	76,6	77,4	77,8	78,53	80,2	82,9	87,1	90,6	95,3	102,9	110,7	128,3	150,9	182,0
93	69,1	71,2	74,5	77,5	78,4	78,8	79,48	81,2	83,9	88,1	91,6	96,4	104,1	111,9	129,7	152,6	184,0
94	70,0	72,1	75,4	78,3	79,2	79,6	80,4	82,2	84,9	89,1	92,6	97,4	105,1	113,9	131,7	154,3	186,0
95	70,9	73,0	76,3	79,2	80,1	80,5	81,3	83,1	85,8	90,1	93,6	98,4	106,1	114,9	132,7	155,9	188,0
96	71,7	73,9	77,2	80,1	81,0	81,4	82,3	84,1	86,8	91,1	94,6	99,4	107,1	115,9	134,7	157,6	190,0
97	72,6	74,8	78,1	81,0	82,0	82,4	83,2	85,1	87,8	92,1	95,6	100,4	108,1	116,9	135,7	159,6	192,0
98	73,5	75,7	79,0	82,0	83,0	83,4	84,2	86,0	88,8	93,1	96,6	101,4	109,1	117,9	136,7	160,6	194,0
99	74,4	76,6	80,0	83,0	84,0	84,4	85,2	87,0	89,8	94,1	97,6	103,4	111,1	119,9	138,7	162,6	196,0
100	75,3	77,5	80,9	84,0	85,0	85,4	86,1	88,0	90,8	95,1	98,6	104,4	112,1	120,9	139,7	164,6	198,0
101	76,1	78,4	81,8	85,0	86,0	86,4	87,1	88,9	91,8	96,1	99,6	105,4	113,1	121,9	141,7	165,6	200,0
102	77,0	79,3	82,7	85,9	86,9	87,3	88,0	89,9	92,8	97,1	100,6	106,4	114,1	123,9	142,7	167,6	202,0
103	77,9	80,2	83,6	86,8	87,8	88,2	89,0	90,9	93,8	98,1	101,6	107,4	115,1	124,9	144,7	169,6	204,0
104	78,8	81,1	84,5	87,7	88,7	89,1	89,9	91,9	94,8	99,1	102,6	108,4	116,1	125,9	145,7	170,6	206,0
105	79,7	82,0	85,4	88,6	89,6	90,0	90,9	92,8	95,7	100,1	103,6	109,4	117,1	126,9	146,7	172,6	208,0
106	80,6	82,9	86,3	89,5	90,5	90,9	91,9	93,8	96,7	101,1	104,6	110,4	118,1	128,9	148,7	174,6	210,0
107	81,5	83,8	87,2	90,4	91,4	91,8	92,8	94,8	97,7	102,1	105,6	111,4	119,1	129,9	149,7	175,6	212,0
108	82,4	84,7	88,1	91,3	92,3	92,7	93,8	95,7	98,6	103,1	106,6	112,4	120,1	130,9	151,7	177,6	214,0
109	83,3	85,6	89,0	92,2	93,2	93,6	94,7	96,7	99,6	104,1	107,6	113,4	121,1	131,9	152,7	179,6	216,0
110	84,2	86,5	90,0	93,1	94,1	94,5	95,7	97,7	100,6	105,1	108,6	114,4	122,1	133,9	154,7	180,6	218,0
111	85,1	87,4	91,0	94,1	95,1	95,5	96,7	98,7	101,6	106,1	109,6	115,4	123,1	134,9	155,7	182,6	220,0
112	85,9	88,2	92,0	95,1	96,1	96,5	97,6	99,6	102,5	107,1	110,6	116,4	124,1	135,9	156,7	184,6	222,0
113	86,8	89,1	92,9	96,0	97,0	97,4	98,6	100,6	103,5	108,1	111,6	117,4	125,1	136,9	158,7	185,6	224,0
114	87,7	90,0	93,9	97,0	98,0	98,4	99,5	101,6	104,5	109,1	112,6	118,4	126,1	138,9	159,7	187,6	226,0
115	88,6	91,0	94,9	98,0	99,0	99,4	100,7	102,5	105,4	110,1	113,6	119,4	127,1	139,9	161,7	189,6	228,0
116	89,5	91,9	95,8	99,0	100,0	100,4	101,7	103,5	106,4	111,1	114,6	120,4	128,1	140,9	162,7	190,6	230,0
117	90,4	92,8	96,7	100,0	101,0	101,4	102,7	104,5	107,4	112,1	115,6	121,4	129,1	141,9	164,7	192,6	232,0
118	91,3	93,7	97,6	101,0	102,0	102,4	103,7	105,5	108,4	113,1	116,6	122,4	130,1	143,9	165,7	194,6	234,0
119	92,2	94,6	98,5	102,0	103,0	103,4	104,7	106,4	109,3	114,1	117,6	123,4	131,1	144,9	166,7	195,6	236,0
120	93,1	95,5	99,4	103,0	104,0	104,4	105,7	107,4	110,3	115,1	118,6	124,4	132,1	145,9	168,7	197,6	238,0
121	93,9	96,3	100,2	103,0	105,0	105,4	106,7	108,4	111,3	116,1	119,6	125,4	133,1	146,9	169,7	199,6	240,0
122	94,8	97,2	101,1	104,0	105,0	105,4	107,7	109,4	112,3	117,1	120,6	126,4	134,1	148,9	171,7	200,6	242,0
123	95,7	98,1	102,0	105,0	106,0	106,4	108,7	110,3	113,2	118,1	121,6	127,4	135,1	149,9	172,7	202,6	244,0

124	96, 5	99, 1	103 ,1	106 ,8	107 ,9	108 ,4	109, 21	111,3	114 ,6	119 ,9	124 ,4	130 ,5	140 ,3	150 ,6	174 ,0	204 ,2	246 ,0
125	97, 4	100 ,0	104 ,0	107 ,7	108 ,8	109 ,3	110, 17	112,3	115 ,6	120 ,9	125 ,4	131 ,6	141 ,5	151 ,8	175 ,4	205 ,9	248 ,0
126	98, 3	100 ,9	105 ,0	108 ,7	109 ,8	110 ,3	111, 14	113,3	116 ,6	121 ,9	126 ,5	132 ,7	142 ,7	153 ,0	176 ,8	207 ,6	250 ,0
127	99, 2	101 ,8	105 ,9	109 ,6	110 ,7	111 ,2	112, 10	114,3	117 ,6	123 ,0	127 ,5	133 ,8	143 ,9	154 ,3	178 ,3	209 ,2	252 ,0
128	100 ,1	102 ,8	106 ,8	110 ,6	111 ,7	112 ,2	113, 07	115,2	118 ,6	124 ,0	128 ,6	134 ,9	145 ,0	155 ,5	179 ,7	210 ,9	254 ,0
129	101 ,0	103 ,7	107 ,8	111 ,5	112 ,6	113 ,2	114, 03	116,2	119 ,6	125 ,0	129 ,6	136 ,0	146 ,2	156 ,8	181 ,1	212 ,6	256 ,0
130	101 ,9	104 ,6	108 ,7	112 ,5	113 ,6	114 ,1	115, 00	117,2	120 ,6	126 ,1	130 ,7	137 ,1	147 ,4	158 ,0	182 ,5	214 ,2	258 ,0
131	102 ,8	105 ,5	109 ,6	113 ,4	114 ,6	115 ,1	115, 96	118,2	121 ,6	127 ,1	131 ,8	138 ,2	148 ,5	159 ,3	184 ,0	215 ,9	260 ,0
132	103 ,7	106 ,4	110 ,6	114 ,4	115 ,5	116 ,0	116, 93	119,1	122 ,6	128 ,1	132 ,8	139 ,3	149 ,7	160 ,5	185 ,4	217 ,6	262 ,0
133	104 ,6	107 ,3	111 ,5	115 ,3	116 ,5	117 ,0	117, 90	120,1	123 ,6	129 ,2	133 ,9	140 ,4	150 ,9	161 ,8	186 ,8	219 ,2	264 ,0
134	105 ,5	108 ,2	112 ,4	116 ,3	117 ,4	118 ,0	118, 87	121,1	124 ,6	130 ,2	134 ,9	141 ,5	152 ,0	163 ,0	188 ,3	220 ,9	266 ,0
135	106 ,4	109 ,1	113 ,3	117 ,2	118 ,4	118 ,9	119, 83	122,1	125 ,6	131 ,2	136 ,0	142 ,6	153 ,2	164 ,3	189 ,7	222 ,6	268 ,0
136	107 ,3	110 ,0	114 ,3	118 ,2	119 ,4	119 ,9	120, 80	123,1	126 ,6	132 ,2	137 ,1	143 ,7	154 ,4	165 ,5	191 ,1	224 ,2	270 ,0
137	108 ,2	111 ,0	115 ,2	119 ,1	120 ,3	120 ,9	121, 77	124,0	127 ,6	133 ,3	138 ,1	144 ,8	155 ,6	166 ,8	192 ,5	225 ,9	272 ,0
138	109 ,1	111 ,9	116 ,2	120 ,1	121 ,3	121 ,8	122, 74	125,0	128 ,6	134 ,3	139 ,2	145 ,9	156 ,7	168 ,0	194 ,0	227 ,6	274 ,0
139	110 ,0	112 ,8	117 ,1	121 ,0	122 ,2	122 ,8	123, 71	126,0	129 ,6	135 ,3	140 ,2	147 ,0	157 ,9	169 ,3	195 ,4	229 ,2	276 ,0
140	110 ,9	113 ,7	118 ,0	122 ,0	123 ,2	123 ,7	124, 67	127,0	130 ,6	136 ,4	141 ,3	148 ,1	159 ,1	170 ,5	196 ,8	230 ,9	278 ,0
141	111 ,8	114 ,6	118 ,9	123 ,0	124 ,2	124 ,7	125, 64	128,0	131 ,6	137 ,4	142 ,4	149 ,2	160 ,8	171 ,3	198 ,3	232 ,6	280 ,0
142	112 ,7	115 ,5	120 ,0	123 ,9	125 ,1	125 ,7	126, 66	129,0	132 ,6	138 ,5	143 ,5	150 ,3	161 ,4	173 ,0	199 ,7	234 ,2	282 ,0
143	113 ,5	116 ,3	120 ,8	124 ,9	126 ,1	126 ,7	127, 59	129,9	133 ,6	139 ,5	144 ,5	151 ,4	162 ,6	174 ,2	201 ,1	235 ,9	284 ,0
144	114 ,4	117 ,2	121 ,8	125 ,9	127 ,1	127 ,6	128, 52	130,9	134 ,6	140 ,5	145 ,5	152 ,5	163 ,8	175 ,5	202 ,5	237 ,6	286 ,0
145	115 ,3	118 ,2	122 ,7	126 ,8	128 ,0	128 ,6	129, 54	132,0	135 ,7	141 ,6	146 ,6	153 ,6	164 ,9	176 ,7	204 ,0	239 ,2	288 ,0
146	116 ,3	119 ,2	123 ,7	127 ,8	129 ,0	129 ,5	130, 46	132,9	136 ,6	142 ,6	147 ,6	154 ,7	166 ,1	178 ,0	205 ,4	240 ,9	290 ,0
147	117 ,2	120 ,1	124 ,6	128 ,7	129 ,9	130 ,5	131, 44	133,9	137 ,6	143 ,6	148 ,8	155 ,8	167 ,3	179 ,2	206 ,8	242 ,6	292 ,0
148	118 ,1	121 ,0	125 ,5	129 ,6	130 ,9	131 ,4	132, 38	134,8	138 ,6	144 ,7	149 ,8	156 ,9	168 ,5	180 ,5	208 ,2	244 ,2	294 ,0
149	119 ,0	121 ,9	126 ,4	130 ,6	131 ,8	132 ,5	133, 40	135,8	139 ,6	145 ,7	150 ,8	158 ,0	169 ,6	181 ,7	209 ,7	245 ,9	296 ,0
150	119 ,9	122 ,8	127 ,4	131 ,6	132 ,8	133 ,4	134, 39	136,8	140 ,7	146 ,7	151 ,9	159 ,1	170 ,8	183 ,0	211 ,1	247 ,6	298 ,0