

**ESTUDIO DE UN MODELO DE PLANEACIÓN Y DISEÑO PARA LA MIGRACIÓN DE
LA RED TELEFÓNICA MÓVIL CELULAR COLOMBIANA HACIA UNA RED
TELEFÓNICA MÓVIL CELULAR DIGITAL CON TÉCNICA DE ACCESO CDMA**



**FABIO ERNESTO SANDOVAL ALEGRIA
MARIA CRISTINA VARGAS SANCHEZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TRANSMISION
POPAYÁN
2002**

**ESTUDIO DE UN MODELO DE PLANEACIÓN Y DISEÑO PARA LA MIGRACIÓN DE
LA RED TELEFÓNICA MÓVIL CELULAR COLOMBIANA HACIA UNA RED
TELEFÓNICA MÓVIL CELULAR DIGITAL CON TÉCNICA DE ACCESO CDMA**

**FABIO ERNESTO SANDOVAL ALEGRIA
MARIA CRISTINA VARGAS SANCHEZ**

**Monografía presentada como requisito para obtener el título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones**

**Director:
Mag. ALDEMAR HOLGUIN ROJAS**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TRANSMISION
POPAYÁN
2002**

A Dios por ser mi guía y apoyo.
A mi familia por su confianza y cariño.
Y a mis amigos por todas las experiencias
compartidas.

María Cristina

A Dios por ser mi guía y apoyo.
A mis padres por los valores inculcados y
su esfuerzo al educarme. A Alvaro y
Patricia por su compañía y a mis familiares
por todos sus buenos deseos familia por su
confianza y cariño.

Fabio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan agradecimientos a:

Aldemar Holguín Rojas, Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. Por el apoyo y asesoría brindada como director del proyecto.

Ricardo José Ariza Moreno, Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Empresa Bellsouth. Por la colaboración con la realización del proyecto en sus diferentes etapas.

A nuestros compañeros y amigos que de alguna forma aportaron al proyecto y a nuestra vida.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE ANEXOS	viii
INTRODUCCIÓN	ix
1. GENERALIDADES.	1
1.1 ELEMENTOS DE UN SISTEMA CELULAR	1
1.1.1 Estaciones Base Celular (EBC).....	1
1.1.2 Centro de Conmutación Móvil (CCM).....	1
1.1.3 Estación Móvil	2
1.1.4 Red Telefónica Pública Conmutada (RTPC)	2
1.2 CELDA.....	2
1.3 DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA AMPS	2
1.3.1 Canales y Características	3
1.3.1.1 Canales de Voz (VCH).....	3
1.3.1.2 Canales de control (CCH)	3
1.3.1.3 Canal de localización (LCR)	4
1.3.2 Mensajes del Canal de Control	4
1.3.2.1 Mensajes del Canal de Control Directo (FCCH).....	4
1.3.2.2 Mensajes Canal de Control Inverso (RCCH).....	5
1.3.3 Función de los Tonos de Control.....	5
1.3.3.1 SAT	5
1.3.3.2 ST.....	5
1.4 SEÑALIZACIÓN.....	5
1.4.1 Señalización por canal asociado (R2)	6
1.4.2 Señalización por Canal Común	6
1.5 LA TELEFONÍA CELULAR EN COLOMBIA	6
1.6 TECNOLOGIAS UTILIZADAS POR LAS COPAÑIAS DE TELEFONIA CELULAR EN COLOMBIA	9
1.7 EVOLUCIÓN HACIA 3G	10
1.7.1 Tecnologías para la evolución hacia 3G	11
1.7.1.1 GPRS	11

1.7.1.2	EDGE	12
1.7.1.3	WCDMA.....	12
1.7.1.4	CDMA2000 1X.....	12
1.7.1.5	CDMA2000 1XEV	13
1.7.2	El Dilema de los Operadores TDMA.....	13
1.7.3	Factores que Restringen las Transmisiones de Alto Ancho de Banda.....	15
1.7.3.1	Respuesta en Potencia y Desgaste de Baterías	15
1.7.3.2	Latencia.....	16
1.7.3.3	Tasa de Errores de Bit (BER).....	16
1.7.4	El Costo de Entregar Velocidades Teóricas de Datos.....	17
1.7.5	Una Alternativa al Modelo de Negocios de Datos de Alta Velocidad de 3G.....	17
1.7.6	El Camino de Migración para los Operadores TDMA/IS-136	18
1.7.7	CDMA2000 1X como alternativa para operadores TDMA/IS-136.....	19
1.7.8	Comparación de los caminos de migración	19
1.7.8.1	El tiempo requerido para desarrollar y desplegar terminales GSM.....	19
1.7.8.2	El despliegue de dispositivos CDMA2000 1X	20
1.7.8.3	Compatibilidad con redes anteriores y costo total de la infraestructura	20
1.7.8.4	El costo de los terminales.....	21
2.	ESTUDIO DE LA TÉCNICA DE ACCESO CDMA.....	24
2.1.	CONCEPTOS DE ESPECTRO ENSANCHADO	24
2.1.1.	Principios de modulación en espectro ensanchado.....	25
2.1.2.	Técnicas de espectro ensanchado	27
2.1.2.1.	Espectro Ensanchado por salto de Frecuencia (FH-SS).....	27
2.1.2.2.	Espectro ensanchado por secuencia directa (DS-SS).....	28
2.1.2.3.	Espectro ensanchado por saltos de tiempo (TH-SS).....	30
2.1.3.	Ganancia de procesamiento de espectro ensanchado.....	30
2.2.	CONCEPTOS DE CDMA.....	31
2.2.1.	Control de potencia	31
2.2.2.	Handoff	34
2.2.3.	Canales CDMA	37
2.2.4.	Codificación ortogonal del canal.....	37
2.2.5.	Codificación ortogonal del canal usando el inicio del código Walsh.....	40
2.2.6.	Canales delanteros en CDMA	42
2.2.7.	Canales de reversa en CDMA	44
2.3.	BENEFICIOS Y VENTAJAS DE CDMA.....	45

3.	DIMENSIONAMIENTO DE LA RED	48
3.1	PREPARACION DE DATOS.....	48
3.2	MIGRACION DEL PLAN DE FRECUENCIAS	49
3.2.1	Patron de reuso n=6	49
3.2.1.1	Impacto de la solucion n=6.....	50
3.2.2	N=7 parte exterior y N=4 parte interior o Solución de grada.....	51
3.2.2.1	Impacto de la solucion de grada.....	52
3.2.3	Apropiación de frecuencias	53
3.2.3.1	Impacto de la solución de apropiación de frecuencias	53
3.3	LIBERACION DE CANALES.....	57
3.4	TRAFICO TELEFONICO	58
3.4.1	Análisis del trafico telefónico cursado por la red TDMA actual	58
3.4.2	Análisis del trafico telefónico para la red CDMA	61
3.4.3	Cálculo del número de canales de voz CDMA.....	67
4.	PROPAGACIÓN Y COBERTURA	69
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	69
4.2.	PERDIDAS DE PROPAGACIÓN.....	70
4.3.	MODELOS DE PROPAGACIÓN	71
4.3.1.	Propagación en el Espacio Libre	71
4.3.2.	Difracción en Cuchilla (Knife-edge Diffraction Model).....	72
4.4.	OTRAS CONSIDERACIONES	72
4.5.	MODELOS DE PROPAGACIÓN EN EXTERIORES	73
4.5.1.	Modelo de Okumura.....	73
4.5.2.	Modelo de Hata.....	74
4.5.3.	Modelo de Walfish y Bertoni	75
4.5.4.	Modelo de Lee	76
4.6.	COBERTURA	76
4.6.1.	Determinación del SAB CDMA con sectores múltiples.....	77
4.6.1.1.	Cálculo del radio de cobertura de celda.....	81
4.7.	PLANEACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO PN.....	83
4.7.1.	Secuencias PN cortas (Short PN Sequences)	84
5.	CONFIGURACION DE LA RED	88
5.1	PARAMETROS DE LAS ESTACIONES BASE Y CCM DE LA RED.....	88
5.2.	SEÑALIZACION	90
5.2.1.	Señalización por canal asociado (R2)	90

5.2.2. Señalización por canal común	90
5.3 EQUIPOS CDMA.....	91
5.3.1. Estación Base BTS.....	91
5.3.1.1 Especificaciones	92
5.3.2. Controlador de Estación Base.....	93
5.3.2.1 Especificaciones	93
5.3.3 Centro de Conmutación Móvil. MSC (Mobile Switching Center).....	94
5.4. ANTENAS PARA SISTEMAS CELULARES.....	95
CONCLUSIONES	97
RECOMENDACIONES	99
BIBLIOGRAFIA.....	100
ACRONIMOS.....	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Elementos del sistema celular.....	2
Figura 2. Uso del espectro celular de los 800 MHz	3
Figura 3. Usuarios de telefonía celular en Colombia	8
Figura 4. Número de llamadas de telefonía celular en Colombia	9
Figura 5. Interfaces de radio IMT-2000	10
Figura 6. Caminos de migración hacia 3G	11
Figura 7. Principios de transmisión de radio digital.....	26
Figura 8. Conceptos de espectro ensanchado	26
Figura 9. Técnicas de espectro ensanchado	27
Figura 10. Técnica de generación para Espectro ensanchado en secuencia directa	28
Figura 11. Principio de ensanchamiento CDMA	29
Figura 12. Ejemplo de espectro ensanchado directo	29
Figura 13. Espectro ensanchado por saltos de tiempo TH-SS	30
Figura 14. Una estación base con dos usuarios hipotéticos. Cada usuario está transmitiendo a la estación base una cantidad fija de potencia p_i	32
Figura 15. Potencia recibida en la estación base proveniente de dos usuarios. El usuario 2 tiene una más alta S/N que el usuario 1.	33
Figura 16. Control de potencia.	33
Figura 17. Se maximiza la capacidad cuando las potencias recibidas de todos los usuarios son iguales en la estación base.	34
Figura 18. (a) Soft handoff entre dos estaciones base – enlace delantero; (b)Soft handoff entre dos estaciones base – enlace de reversa.	35
Figura 19. Señal de espectro ensanchado (SS) del enlace delantero de CDMA.....	36
Figura 20. Codificación ortogonal del canal.....	38
Figura 21. Ensanchamiento ortogonal del patrón transmitido	38
Figura 22. Desensanchamiento ortogonal del patrón recibido	39
Figura 23. Desensanchamiento ortogonal del patrón recibido con una función incorrecta	39
Figura 24. Herramienta número uno para ensanchamiento: Código Walsh	41
Figura 25. Secuencia PN corta	42
Figura 26. Código largo de usuario.....	42
Figura 27. Canales delanteros en CDMA.....	43
Figura 28. Liberación del espectro	50

Figura 29. Posibles soluciones a migración del plan de frecuencias.....	51
Figura 30. Patrón de reuso N=6.....	51
Figura 31. Solución de grada.....	52
Figura 32. Apropiación de frecuencias.....	53
Figura 33. Configuración N=6.....	54
Figura 34. Configuración N=4 y N=7.....	55
Figura 35. Configuración N=7, apropiación de frecuencias.....	55
Figura 36. Estaciones base TDMA. Ciudad de Cali.....	60
Figura 37. Mapa futuras zonas CDMA. Ciudad de Cali.....	63
Figura 38. Gráfica de tráfico actual por futuras zonas CDMA.....	65
Figura 39. Modelo Walfish y Bertoni.....	75
Figura 40. Cobertura estaciones base CDMA. Ciudad de Cali.....	85
Figura 41. Una situación donde un móvil no puede distinguir las secuencias PN recibidas de dos estaciones base.....	86
Figura 42. Secuencias PN en el dominio del tiempo.....	87
Figura 43. Patrón de radiación de la antena tipo DB87H-120X.....	96
Figura 44. Patrón de radiación de la antena tipo DB809K-XC.....	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Cubrimiento Telefonía celular en Colombia 1994	7
Tabla 2.	Precios de ventas totales de teléfonos móviles	22
Tabla 3.	Comparación de ganancia de procesamiento de CDMA contra TDMA	30
Tabla 4.	Ventajas de ganancia de procesamiento de CDMA sobre TDMA	31
Tabla 5.	Tres secuencias de ensanchamiento	37
Tabla 6.	Características y beneficios de CDMA	45
Tabla 7.	Capacidad relativa de CDMA	47
Tabla 8.	Comparación entre las soluciones de migración de frecuencias	56
Tabla 9.	Distribución de frecuencias en la banda B celular.....	57
Tabla 10.	Distribución de frecuencias de la portadora CDMA en la banda B celular	58
Tabla 11.	Estaciones base y sectores de la ciudad de Cali	59
Tabla 12.	Tráfico actual cursado por las Estaciones base de la ciudad de Cali	62
Tabla 13.	Tráfico telefónico total por zonas.....	67

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. CODIGOS DE WALSH

ANEXO B. INGENIERIA DE TRAFICO

ANEXO C. PROCESOS DE LLAMADA

ANEXO D. ANALISIS DE LOS ENLACES DELANTERO Y DE REVERSA EN CDMA

1. GENERALIDADES

Este capítulo muestra los conceptos básicos de la telefonía móvil celular, sus inicios y evolución en Colombia así como los factores que hacen necesaria la adopción de nuevas tecnologías que permitan a los operadores migrar en un futuro a la tercera generación de comunicaciones móviles para prestar más y mejores servicios a sus usuarios.

1.1 ELEMENTOS DE UN SISTEMA CELULAR

Un sistema celular se forma al dividir el territorio al que se pretende dar servicio, en áreas más pequeñas llamadas celdas, cada una de las cuales, es atendida por una estación base restringiendo su cobertura a la misma, al aprovechar la propagación limitada de las ondas de radio a frecuencias elevadas, y utilizando enlaces de microondas para comunicarse con las estaciones base conectadas a las centrales telefónicas y celulares.

1.1.1 Estaciones Base Celular (EBC)

Es el punto físico donde se instalan todos los elementos necesarios para el funcionamiento de los transmisores y receptores. Tiene como función básica comunicar la central celular con todas las unidades móviles que se encuentran dentro de la cobertura de estas. Desempeña funciones locales de control, monitorización y supervisión de las llamadas, además de la recomendación del handoff al sistema.

1.1.2 Centro de Conmutación Móvil (CCM)

Una Central de Telefonía Celular no es otra cosa sino una Central de Telefonía Pública dedicada al servicio de telefonía celular, y se compone de dos sistemas: el sistema de computación y el sistema de procesamiento de datos. Su principal función es el manejo y control de los demás elementos del sistema como son las Estaciones Base, Enlaces y los Equipos Terminales, también la interconexión con la RTPC y actividades de tarificación.

1.1.3 Estación Móvil

Una unidad móvil contiene una unidad de control, un transceptor y un sistema de antena. Pueden ser portátiles, móviles y transportables de acuerdo a su tamaño y sensibilidad. Representa una interfaz entre el usuario y el sistema. Estas unidades están habilitadas para sintonizar cualquier canal y para transmitir a un nivel de potencia determinado.

1.1.4 Red Telefónica Pública Conmutada (RTPC)

El Centro de conmutación móvil se une a la RTPC mediante troncales para permitir la comunicación de los usuarios celulares y los usuarios de telefonía fija.

1.2 CELDA

Es el área abarcada por la señal de una estación base celular. En la práctica el área de esta asume un perímetro irregular, determinado utilizando medidas de campo. Para análisis matemáticos se adoptó como representación de la celda el hexágono, que es un polígono regular con perfil próximo al círculo (ver figura 1).

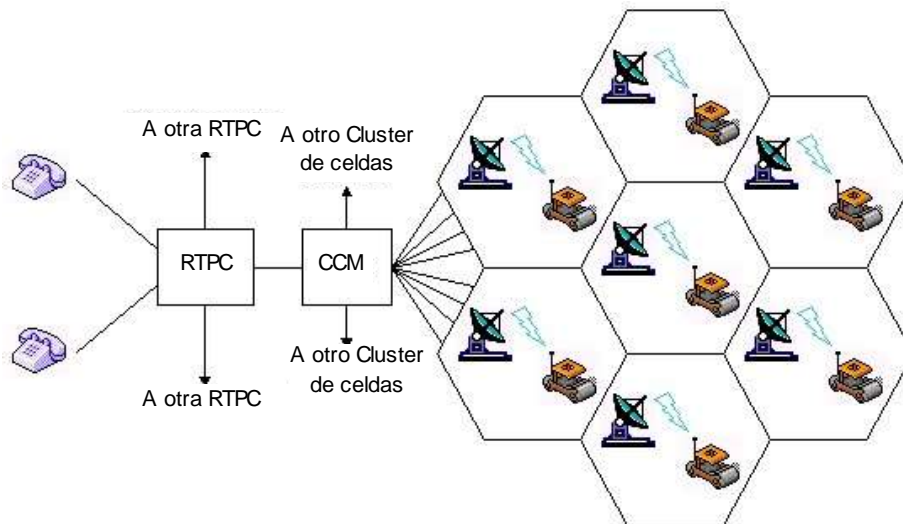


Figura 1. Elementos del sistema celular

1.3 DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA AMPS

Características principales del sistema AMPS:

- Anchura del canal = 30 KHz.
- La diferencia entre las frecuencias TX y RX, en un mismo canal es de 45 MHz.

- Total de canales = 832 (416 para cada banda).
- Los canales son numerados del 1 al 1023 (800 a 990 no se utilizan) (Ver figura 2)
- Ocupación de 50 MHz del espectro (824,04 a 848,97 MHz y 869,04 a 893,97 MHz).
- Los canales utilizados en los sistemas móviles se componen de un par de frecuencias. Una para comunicación en sentido directo (EBC-Móvil) y otra para comunicación en sentido inverso (Móvil-EBC).

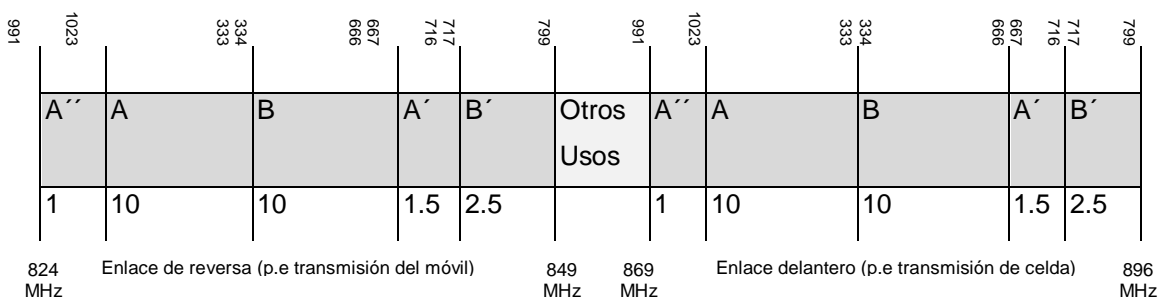


Figura 2. Uso del espectro celular de los 800 MHz

1.3.1 Canales y Características

1.3.1.1 Canales de Voz (VCH)

Destinados a transmisión y recepción de:

- Señales de voz (Señales de 300 a 3400 Hz).
- Tonos de control: Tonos durante la llamada.
- SAT: Con frecuencias de 5970, 6000 y 6030 Hz.
- ST: Con un valor de 10 KHz.

1.3.1.2 Canales de control (CCH)

Se usan para intercambio de información entre el sistema y las unidades móviles y tienen las siguientes funciones:

- Mensajes de cabecera como SID, VMAc y DCC.
- Búsqueda del abonado o Paging.
- Acceso del abonado al sistema.
- Mensajes de control.

1.3.1.3 Canal de localización (LCR)

Es un transceptor de la estación base dedicado exclusivamente al monitoréo de la señal RSSI. Está controlada por la central de conmutación móvil, sintoniza cualquier canal de su dominio y monitorea la potencia de la señal recibida en ese canal, también verifica el tono SAT y puede monitorear un canal de una estación base vecina para solicitudes de handoff normal o intersistemas.

1.3.2 Mensajes del Canal de Control

1.3.2.1 Mensajes del Canal de Control Directo (FCCH)

Es un flujo continuo de datos modulados en FSK a la velocidad de 10 Kbps. Cada palabra enviada a la unidad móvil contiene 40 bits, 28 de los cuales son de información codificada y 12 de paridad. El código usado es BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem). Estos son una potente clase de códigos cíclicos que proporcionan una gran selección de bloques de longitud, índice de código, tamaño de alfabeto y capacidad de corrección de error.

Los principales mensajes enviados en el FCCH son:

Mensaje de cabecera (Overhead)

Contienen los datos generales del sistema y son enviados a todas las unidades móviles activas presentes en el área de servicio. Contienen entre otras las siguientes informaciones: SID y DCC para identificar canal de control e información referente a cuando cada móvil debe registrarse.

Mensajes de control de la unidad móvil.

Contiene informaciones direccionadas a una determinada unidad móvil.

- Datos de búsqueda como: MIN, SCC y número del canal inicial de voz.
- Control de nivel de potencia de transmisión del móvil en el canal de voz.
- Ordenes para alerta.

Mensajes de relleno

Son mensajes para relleno del canal cuando no hay otros mensajes para transmitir.

1.3.2.2 Mensajes Canal de Control Inverso (RCCH)

Este va en dirección del móvil a la EBC modulada en FSK, con velocidad de 10 Kbps. El mensaje comienza por una secuencia para sincronismo de bit, seguida por una palabra de sincronismo de byte y el DCC.

Cada mensaje del RCCH puede consistir de una a cinco palabras. Los tipos de mensajes transmitidos pueden ser:

- Respuesta al paging.
- Mensaje de originación de llamada.
- Mensaje de confirmación de recibimiento de orden.
- Mensaje de orden.

1.3.3 Función de los Tonos de Control

1.3.3.1 SAT

Previene errores debido a interferencia cocanal, es decir, debe certificarse de que el canal que está recibiendo no es cocanal de un grupo (cluster) vecino. Se recibe en el móvil a través del VCH a una frecuencia superior a la de la voz y no audible. Se usa también para el monitoreo de la calidad de la señal recibida por la estación base y la integridad del canal. Una detección en el canal de un tono SAT diferente al grupo (Cluster), retira inmediatamente de servicio al móvil o intenta un handoff a otro canal disponible.

1.3.3.2 ST

Se trata de un tono de 10 KHz unidireccional (Móvil-EBC), que indica si el teléfono está o no en uso, por medio de la duración de señal, también es usado para notificar la desconexión (1,8 s), handoff (50ms) y pedido de servicios especiales.

1.4 SEÑALIZACIÓN

El intercambio de datos entre centrales de conmutación con el fin de establecer una comunicación entre usuarios o para ofrecerles facilidades o servicios especiales, no sería posible sin los protocolos de señalización.

Los sistemas de señalización usados por la central celular para la comunicación con otras centrales ya sean de la red telefónica pública conmutada (RPTC) u otros operadores celulares en la misma área, son:

1.4.1 Señalización por canal asociado (R2)

Esta señalización está compuesta por señales de línea y de registro y puede ser usada por la central para comunicarse con la RPTC y otros operadores en la misma área en caso que no sea posible la comunicación por el sistema CCS7. Para la comunicación de las estaciones base con los abonados se usa el protocolo IS-54A para llamadas analógicas y el protocolo IS-136 para llamadas digitales.

1.4.2 Señalización por Canal Común

Son mensajes estructurados que viajan a través de la red de señalización que está superpuesta a la red de conmutación de circuitos. En Colombia se encuentran en servicio dos redes de señalización de este tipo:

Señalización IS-41: Sigue la norma ANSI y es usada únicamente, en la central celular para comunicarse con centrales celulares de otras áreas que prestan el servicio en la otra banda en la misma área.

Señalización ISUP: Para el establecimiento de llamadas telefónicas que siguen las normas de la ITU, es decir, son usadas por la central celular para comunicarse con la RPTC y centrales telefónicas celulares que prestan el servicio en la otra banda en la misma área.

Para la comunicación de la central celular con las estaciones base se usan los protocolos IS-54A (parte analógica), e IS-136 (parte digital). Es de anotar que para la comunicación de las estaciones base con los abonados se usan estos mismos dos protocolos.

1.5 LA TELEFONÍA CELULAR EN COLOMBIA

Como resultado de la apertura del mercado de telecomunicaciones a la cual el gobierno dio vía libre por medio de la ley 82 de 1989 y la reglamentación de la prestación del servicio de telefonía móvil celular en la ley 37 de 1993, se inició la telefonía celular en Colombia. La operación como tal de la telefonía celular en Colombia se remonta a principios del año 1994, cuando se adjudicaron por concesión los derechos para operar este servicio en Colombia.

Para efectos de dicha adjudicación, el ministerio de comunicaciones dividió el país en tres regiones (Oriental, Occidental y Costa atlántica) dando lugar a un esquema de libre competencia por área. Según la reglamentación fijada por el gobierno, cada área debería ser operada por un operador mixto (Conformado por operadores de telefonía convencionales y socios particulares) y un operador privado. La concesión del derecho a operar se dio en dos etapas: Una adjudicación de la banda de frecuencias B para los operadores privados realizada el 22 de Enero de 1994, y una concesión posterior de la banda A para los operadores mixtos, llevada a cabo el 17 de febrero del mismo año. La concesión otorgada brindó la posibilidad de operar en forma exclusiva los primeros 5 años (Hasta 1999), lo que significaba que el ministerio de comunicaciones otorgaría nuevas licencias a partir de dicho año.

En 1994, seis firmas adjudicatarias entraron a competir desde entonces: Comcel, Celumovil, Cocelco, Ocel, Celumovil de la Costa y Celcaribe. Celumovil (con el respaldo técnico y operativo de AT&T, propietaria del operador celular McCaw Cellular Communications), a la cual le fueron adjudicadas las zonas Oriental y de la costa, fue la primera compañía en iniciar labores (Junio de 1994). Con el objeto de iniciar labores antes que sus competidores, Celumovil instaló en cuatro meses las primeras doce celdas en Bogotá, dos en Barranquilla y dos en Cartagena, con planes de expansión de cerca de 40 celdas más para la capital (1994). Los planes de cobertura de las seis compañías para el año 1994 se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Cubrimiento Telefonía celular en Colombia 1994.

Area	Empresa	Operador Principal	Proveedor equipos	Plan expansión		Básico
				Año1	Año5	Año 10
Oriental	Comcel	ETB, Telecom	Nortel	25890	84044	200994
	Bellsouth (Celumovil)	McCaw	Nortel	30693	78693	177694
Occidental	Comcel (Ocel)	EPM	Nortel	20606	98303	153647
	Bellsouth (Cocelco)	Tel España/Chile	Ericsson	8089	38297	120507
Costa Atlántica	Celcaribe	Millicon Int.	Ericsson	4304	62801	120507
	Bellsouth (Celumovil Costa)	McCaw	Nortel	12799	36056	81418

Por otro lado a mediados de 1995 las alianzas estratégicas comenzaron a notarse como muestra de la competencia de la industria las tres compañías mixtas operadoras de la banda A (Ocel, Comcel y Celcaribe) conformaron la red celular más grande del país (Redcel), ofreciendo ventajas como unificación de códigos de marcación.

De igual manera, las tres compañías de la banda B (Celumovil, Celumovil de la costa y Cocelco) se unieron para ofrecer el roaming automático con su número único nacional. Hacia Marzo de 1988, Comcel adquirió el 68.4% de Occel. Por último la compañía multinacional Bellsouth adquirió a Celumovil que había absorbido a Celumovil del Caribe y el 40% de Cocelco. Las estrategias de consolidación mencionadas han generado el incremento de poder del mercado de las compañías líderes (Comcel y Bellsouth), generando así anticipadas respuestas a la entrada de los PCS. La disminución de costos generada por la consolidación afecta positivamente a los usuarios ya que, por ejemplo, los costos del roaming han sido casi eliminados y los costos de interconexión reducidos. Los costos de ventas también son reducidos, ya que los costos de publicidad son distribuidos entre una mayor cantidad de usuarios.

Actualmente existen en el país cerca de 2 millones de usuarios (Ver figura 3). Después de la competencia en precios mantenida hasta julio de 1997, las compañías están compitiendo en productos y servicios orientados a diferenciarse de sus competidores (Ver figura 4). Es aquí donde está el triunfo de una empresa.

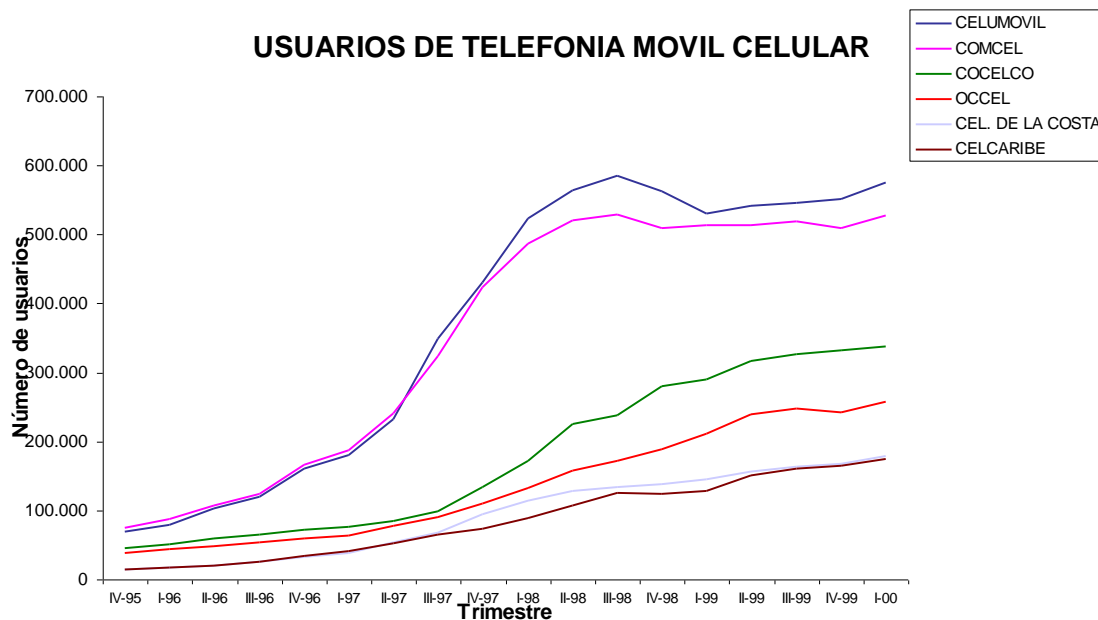


Figura 3. Usuarios de telefonía celular en Colombia*

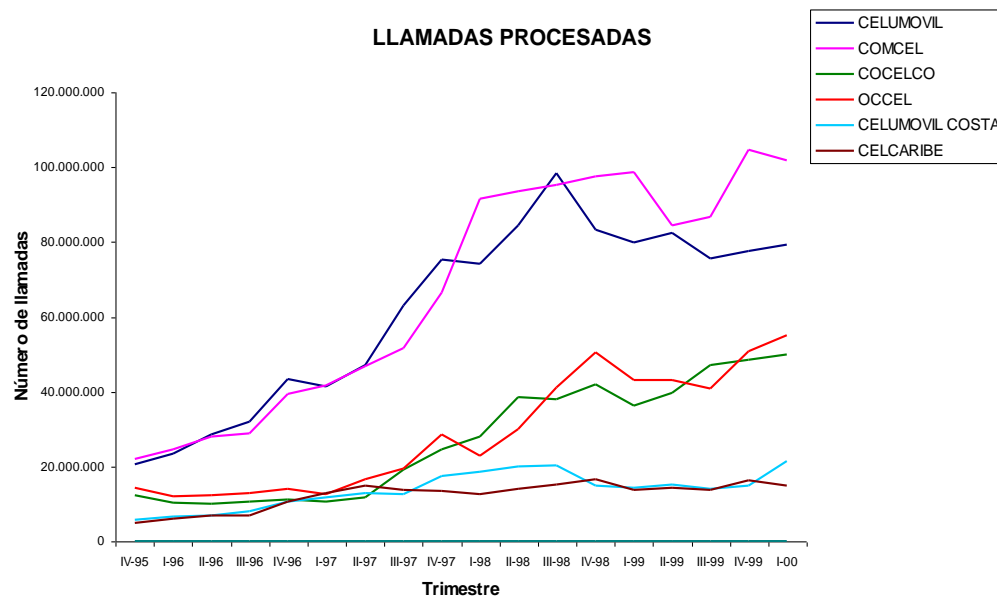


Figura 4. Número de llamadas de telefonía celular en Colombia*

* Fuente: Ministerio de Comunicaciones de Colombia

1.6 TECNOLOGIAS UTILIZADAS POR LAS COPAÑIAS DE TELEFONIA CELULAR EN COLOMBIA

El aumento creciente en el número de clientes celulares hace que haya un incremento continuo de la capacidad del sistema, usualmente reduciendo el tamaño de celda (Area de cobertura) y adicionando nuevas estaciones base. Sin embargo, estas soluciones no siempre son viables, ya que constituyen costos adicionales elevados y en otros casos las dificultades físicas y de propagación lo impiden.

Inicialmente el ministerio de comunicaciones exigió a las compañías celulares una prestación del servicio de 70-30 es decir 70% de la red debía ser digital y el 30% analógica.

La parte analógica se instaló para cubrir zonas rurales y la digital para cubrir zonas urbanas. Inicialmente para la parte digital se utilizó el estándar IS-54 introducido en 1989 por el TIA/CTIA. El IS-54B, provee 3 canales de voz TDMA en el espacio de un canal analógico de 30 KHz y canal de control analógico; lo que permitió características que incluían autenticación, identificación de llamada, mensaje de llamada en espera entre otros.

IS-54B fue remplazada con la introducción de IS-136 que es compatible con la anterior e incluye DCCH y características especiales y es el que actualmente opera en la red digital Colombiana y permite a las compañías de telecomunicaciones ofrecer servicios digitales avanzados. Estos sistemas permiten que, cuando se presenta un nivel de señal muy bajo en el receptor móvil, este pueda pasar a un modo alterno que es analógico y pueda seguir en comunicación con la estación base.

1.7 EVOLUCIÓN HACIA 3G

Teniendo en cuenta la evolución de las comunicaciones, la demanda de nuevos servicios y la necesidad de utilizar mejor el espectro la tendencia mundial va encaminada hacia los sistemas de tercera generación que están contemplados en la norma IMT2000 (América) y UMTS (Europa). Los operadores móviles en la banda celular en Colombia no pueden ser ajenos a esta tendencia y necesitan competir con más y mejores servicios.

Como primer paso, aclararemos lo que se entiende por 3G.

Por definición de la UIT, la interfaz de RF de 3G debe entregar velocidades de 144 kbps o superiores. Más precisamente, el estándar 3G especifica 144 kbps en un ambiente móvil, 384 kbps en un ambiente peatonal y 2 Mbps en un ambiente fijo¹.

En marzo de 1999, la ITU terminó la búsqueda de un estándar único, IMT-2000 y adoptó una familia de estándares que son los siguientes.

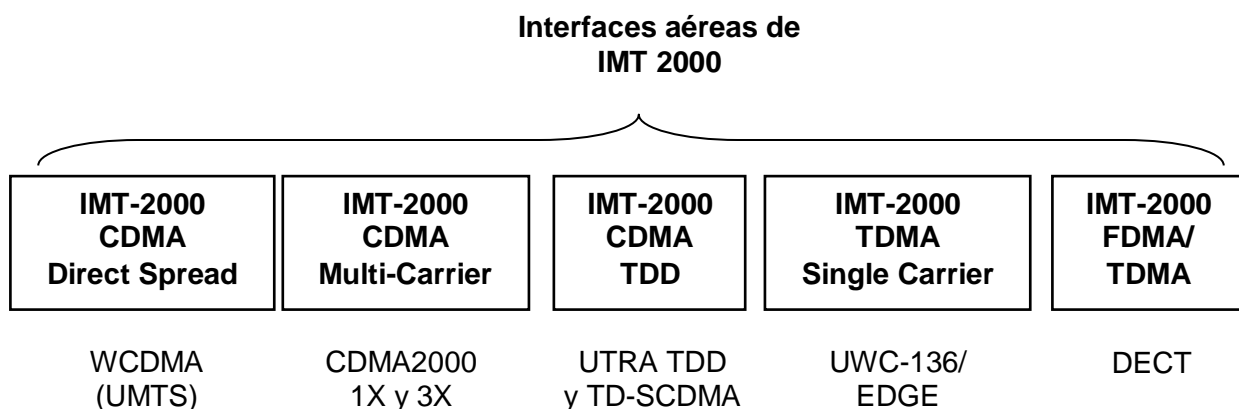


Figura 5. Interfaces de radio IMT-2000

¹ "The Road to IMT-2000," http://www.itu.int/imt/what_is/roadto/index.html.

En la anterior gráfica se demuestra que la mayor parte de la industria ha convergido en CDMA por su alta capacidad, robustez en la prestación de servicios, flexibilidad para combinar la voz con los servicios de datos y escalabilidad desde servicios de voz a baja velocidad a servicios de datos de hasta 2 Mbps.

1.7.1 Tecnologías para la evolución hacia 3G

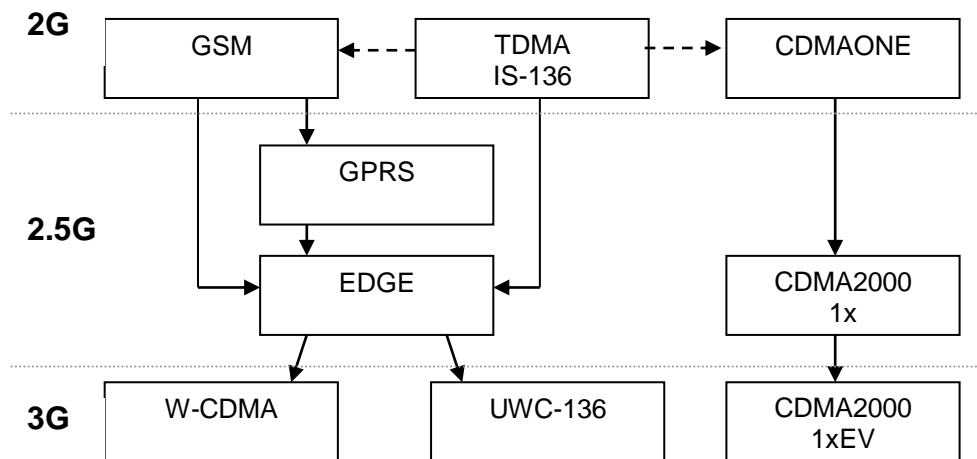


Figura 6. Caminos de migración hacia 3G

GSM y CDMAONE son tecnologías de segunda generación que hacen presencia en todo el mundo. Nos enfocaremos principalmente en los caminos de evolución que podría tomar TDMA/IS-136, pues es la tecnología que utilizan los operadores de telefonía celular en Colombia.

1.7.1.1 GPRS

El Servicio General de Radio Modo Paquete GPRS es un servicio de valor agregado que permite enviar y recibir información a través de una red de telefonía móvil, complementado con conmutación por circuitos de datos y Servicio de mensajes cortos SMS. Teóricamente la velocidad máxima alcanzada con GPRS es de 171.2 Kbps utilizando los ocho intervalos de tiempo, permitiendo que la información pueda ser transmitida mas rápida y eficientemente a través de la red móvil. La conmutación por paquetes significa que los recursos de radio de GPRS se utilizan únicamente cuando los usuarios están enviando o recibiendo datos. El número de usuarios soportado depende de la aplicación que se utilice y de la cantidad de datos que se esté transfiriendo.

1.7.1.2 EDGE

Es el segundo paso en el camino de GSM hacia 3G. EDGE cambia el esquema de modulación. El primer paso GPRS está basado en la modulación GMSK la cual produce únicamente un incremento moderado en la velocidad de los datos por intervalo de tiempo sobre GSM. El nuevo esquema de modulación introducido por EDGE se llama 8PSK el cual permite mucha mayor velocidad de bits.

EDGE está basada en la tecnología TDMA y está diseñada para introducirse en las redes digitales GSM y TDMA existentes, soportando servicios multimedia hasta una velocidad de transmisión de datos de 384 Kbps por portadora.

1.7.1.3 WCDMA

El Acceso múltiple por división de código en banda ancha WCDMA es la tecnología para el acceso de radio seleccionada por el ETSI.

La tecnología provee velocidades de acceso de 2 Mbps en área local y acceso a 384 Kbps en área extendida con movilidad total. Estas velocidades de datos más elevadas requieren una banda ancha de frecuencia de radio, y es por eso que WCDMA ha sido seleccionado con una portadora de 5 MHz.

1.7.1.4 CDMA2000 1X

El estándar IS-2000 o IS-95C (CDMA2000 1x) fue elaborado y publicado por la TIA. CDMA1x ofrece una gran capacidad de voz, velocidades de datos promedio de 144 Kbps, compatibilidad con redes antiguas y aumento en el desempeño de la red.

1x se refiere a la implementación CDMA2000 dentro de la asignación de espectro existente (portadoras de 1.25 MHz). El término técnico es derivado de N=1 (usa portadoras de 1.25 MHz) y el 1x significa una portadora de 1.25 MHz. CDMA2000 1x se puede implementar en el espectro existente o en una nueva asignación de espectro.

Una red CDMA2000 1x también introduce servicios de voz y datos simultáneos, baja latencia en transmisión de datos y otros mejoramientos en cuanto al desempeño.

1.7.1.5 CDMA2000 1XEV

La evolución de CDMA2000 1x es conocida como CDMA2000 1xEV. 1xEV está dividido en dos pasos: 1xEV-DO y 1x EV-DV. 1xEV-DO es el estándar para la evolución de CDMA1x solamente en datos. 1xEV-DV es el estándar par la evolución de CDMA1x en voz y datos. Los dos pasos de evolución 1xEV suministran servicios avanzados en CDMA2000 usando una portadora estándar de 1.25 MHz.

Repasando los caminos de migración, nos enfocamos en los problemas comerciales que los operadores TDMA/IS-136, que son los que actualmente están trabajando en Colombia, deben tratar, escogiendo una alternativa para llegar a 3G. Cuatro de estos problemas son:

1. Incrementar la inversión media por usuario.
2. Minimizar los costos del despliegue de tecnología adoptando el proceso de despliegue más simple (y por lo tanto el más barato).
3. Desplegar servicios comerciales viables de una manera oportuna.
4. Proporcionar una experiencia satisfactoria al usuario a lo largo del proceso.

No debemos olvidar la importancia de los servicios de voz. Usando técnicas de compresión y una gestión más sofisticada del ancho de banda, 3G traerá eventualmente aplicaciones como video en tiempo real y aplicaciones multimedia. Lo que quiere decir que los servicios de voz seguirán dando a los operadores las mayores ganancias en el futuro cercano. El incremento de la transmisión de datos no desplazará el tráfico de voz pero si lo expandirá.

1.7.2 El Dilema de los Operadores TDMA

La mayor complejidad, costo, dificultad, y tiempo de ejecución para la migración a 3G provendrán de TDMA/IS-136 pues esta se está convirtiendo en una tecnología huérfana. Las tecnologías huérfanas se caracterizan por dos limitaciones.

1. Llenan sólo una necesidad del mercado a corto plazo.
2. No ofrecen ninguna base para evoluciones posteriores

Por su naturaleza, las tecnologías huérfanas están reemplazadas por alternativas mucho más funcionales y/o más baratas. Por esta razón, no presentan ventajas a los operadores de red y/o usuarios finales. Para los fabricantes, esto significa una rápida disminución en sus volúmenes de

producción y ganancias. Cuando los fabricantes reconocen esto, detienen su inversión en I+D (Investigación y desarrollo). Esto acelera la decadencia de la tecnología. Con esto, la tecnología huérfana se retrasa más y más con respecto a las nuevas tecnologías. Cuando se queda atrás, la tecnología huérfana provee menos y menos beneficios a los operadores de red y/o a los usuarios y eventualmente, es abandonada.

Algunos ejemplos de tecnologías huérfanas incluyen el telégrafo (reemplazado por el teléfono), telex (reemplazado por el fax, el cual a su vez ha sido reemplazado por el e-mail), y la conmutación de circuitos (reemplazada por la conmutación de paquetes).

Las ventas mundiales de terminales demuestran que TDMA/IS-136 está convirtiéndose en una tecnología huérfana. Durante el año 2000, 63% de terminales vendidos fueron GSM, 13% fueron CDMAONE, y 9% fueron TDMA². El volumen relativamente pequeño para TDMA lo ha hecho el menos atractivo para los fabricantes. El inicio del fin de TDMA fue sellado por el anuncio de AT&T Wireless, en noviembre del 2000, de que estaba abandonando los planes para incorporar GPRS y EDGE en TDMA. En cambio, AT&T anunció que sobrepondrá GSM en su red TDMA³. En concepto, esto le permitirá a AT&T desplegar GSM-GPRS, GSM-GPRS-EDGE, y, asumiendo espectro disponible, GSM-GPRS-EDGE-UMTS como su camino de migración a 3G.

Al Adoptar GSM, AT&T acaba con cualquier esperanza para el desarrollo posterior de TDMA/IS-136 y una migración a 3G basado en este. Esto significa que todos los operadores TDMA deben escoger una nueva alternativa de migración.

Sin tener en cuenta si los operadores TDMA/IS-136 escogen GSM o CDMA como un camino de migración a 3G, enfrentan las mismas dos barreras de transición.

1. El reto y costos de desplegar redes GSM o CDMA paralelas a la red TDMA establecida.
2. El desafío y costos de usar esa red paralela para hacer la transición a 3G.

Esto quiere decir que, GSM y CDMA ofrecen alternativas de migración substancialmente diferentes. Exploraremos éstos en las secciones siguientes y miraremos principalmente los problemas de despliegue oportuno y costos para justificar que CDMA y comercialmente CDMA2000 1x es la mejor alternativa de migración a 3G.

² "Terminal Sales by Technology, World Market, 1992-2000," *Shosteck E-STATS*,

³ "AT&T to Ditch TDMA for GSM-Based Data Migration," *3G Mobile*, November 29, 2000, pp. 1-2.

Las altas velocidades necesarias para la transmisión de servicios como video en tiempo real no han sido comercialmente lanzadas, sólo han podido ser alcanzadas dentro de ambientes de prueba idealizados donde no existe interferencia y los inconvenientes geográficos son mínimos. Sin embargo, en el mundo comercial, se deben considerar los costos y que la radio frecuencia (RF) debe ser transmitida bajo condiciones imperfectas de congestión de frecuencias, ruido RF de fondo e inconvenientes geográficos. Bajo estas condiciones, los servicios comerciales de anchos de banda de 384 kbps no han sido probados aún.

En el caso de CDMA2000 1X, se anticipan velocidades de datos en movimiento de 30–40 kbps en un corto tiempo a pesar de la expectativa teórica de 144 kbps⁴. En el caso de GSM-GPRS, se anticipan velocidades de datos en un corto tiempo de 20–30 kbps, A pesar de la expectativa teórica de 115 kbps.

1.7.3 Factores que Restringen las Transmisiones de Gran Ancho de Banda

A parte del problema costo - beneficio, múltiples factores limitan las transmisiones de gran ancho de banda en un mundo real. La mayoría, pero no todos, provienen de la inmadurez de las tecnologías. Algunos factores pueden ser más relevantes a una interfaz de RF que a otra. Con el tiempo y con suficientes esfuerzos en Investigación y Desarrollo, estos factores serán superados. Hasta que se superen, tales factores no permiten aproximaciones a las velocidades requeridas. Brevemente se discutirán a continuación tres factores :

- Respuesta en Potencia y Desgaste de Baterías
- Latencia
- Tasa de Errores de Bit (BER)

1.7.3.1 Respuesta en Potencia y Desgaste de Baterías

Para GSM, la voz convencional se transmite en un “time slot” a 9.6 kbps. Un ancho de banda para 3G se logra a más de 384 kbps (40 veces más que 9.6 kbps). Independientemente de la tecnología de RF, estas transmisiones requieren una gran cantidad de potencia, y por lo tanto producen más desgaste de baterías. Esto planteará un problema para todas las nuevas tecnologías, aunque de menor forma para CDMA2000 1X y UMTS que para GSM, GPRS, y EDGE.

⁴ 8. “U.S. Operators Reveal Their Hands for 3G Buildout,” *3G Mobile*, April 4, 2001, p. 1.

La potencia de transmisión requerida para todas las tecnologías CDMA, incluyendo CDMA2000 1X, es continuamente ajustada de acuerdo a la cantidad de bits que está siendo transmitida. Si, en un momento particular, pocos bits están siendo transmitidos, como en un mensaje corto, se utiliza menos potencia. Si más bits están siendo transmitidos, como en un video, se utiliza más potencia. Esto es comúnmente llamado velocidad variable de datos. De esta manera, CDMA2000 1X y UMTS son más eficientes, por que asignan solo la potencia de RF necesaria para enviar los bits que están siendo transmitidos. El desgaste de la batería variará de acuerdo a esto. Esto quiere decir que el desgaste promedio de la batería será relativamente menor que para tecnologías diferentes a CDMA.

1.7.3.2 Latencia

La latencia se refiere al retardo en la transmisión desde el momento en que entra a la red hasta el momento que la deja. Baja latencia significa retardos cortos. Alta latencia significa largos retardos. La latencia puede ocurrir en el teléfono o en la red. La latencia que ocurre entre el teléfono y la estación base se llama latencia de acceso. La latencia que ocurre desde la estación base hacia la red es llamada latencia de la red. La baja latencia es esencial para transmisiones de tiempo real.

Esto significa que aun cuando una red móvil se configure para proporcionar una latencia baja, el operador no puede garantizarla para el usuario final que usa sus dispositivos móviles para acceder a otras redes o a quién usa sus terminales en un ambiente hostil, y por lo tanto introduciendo latencia.

1.7.3.3. Tasa de Errores de Bit (BER)

La voz es menos exigente respecto a la transmisión de errores que la transmisión de datos. La razón de esto, es por la habilidad del cerebro humano para reconstruir las partes perdidas de las conversaciones.

La transmisión de datos no provee esta ventaja de reconstrucción. Si se pierde un dato, sólo puede recobrase por medio de sofisticados algoritmos de corrección de errores. Tales correcciones de error adicionan redundancias a las transmisiones de RF. Estas redundancias retrasan la velocidad de los datos.

1.7.4. El Costo de Entregar Velocidades Teóricas de Datos

En un futuro previsible, el costo de entregar velocidades teóricas de datos probará ser económica y comercialmente insostenible. Proveer algo parecido a 384 kbps en cualquier lugar en tiempo real requerirá enormes inversiones por parte de los operadores. No se debe olvidar que los operadores deben expandir la capacidad de RF para proveer tales velocidades para contenido de datos o imágenes sin comprometer la capacidad de RF necesaria para llevar tráfico de voz convencional. Si el tráfico de datos hace que el servicio de voz se degrade, esto no será del agrado de los usuarios de voz.

1.7.5. Una Alternativa al Modelo de Negocios de Datos de Alta Velocidad de 3G

Sin tener en cuenta las velocidades que las tecnologías pueden llegar a entregar, los factores económico y tecnológico llevarán a los operadores a proporcionar velocidades de datos menores.

El caso de negocios para 3G no vendrá de proveer un gran ancho de banda masivo, es decir 384 Kbps en cualquier lugar. En cambio, este vendrá de proveer una mezcla de voz y tráfico de datos a un costo eficiente y una conectividad de bajo costo a Internet.

Esto no quiere decir que una velocidad de datos a 9.6 kbps será suficiente. Con el tiempo, no lo será. Mientras se logran las velocidades prometidas. Los operadores hablan de proveer de 20–40 kbps. La economía y no la tecnología limitarán las velocidades de datos que eventualmente experimentarán los usuarios.

El problema de 3G no es técnico sino comercial “Convertir los servicios de 3G en dinero.” Para hacerlo, debe haber un esfuerzo para proveer una “calidad de voz razonable” y servicios de datos para “satisfacer a los usuarios razonablemente pero no absolutamente”. Algunos operadores piensan que intentar proveer altas velocidades de datos y absoluta satisfacción del usuario es peligroso. Para hacerlo, se tendría que gastar mucho dinero, y esto reduciría sus ganancias⁵.

En vez de enfocarse en un distante y comercialmente incierto objetivo de proveer datos a más de 144 kbps, los operadores deben centrarse en un inmediato y comercialmente provechoso objetivo de velocidades de 30–50 kbps y desarrollar aplicaciones lucrativas que trabajen a estas velocidades. Para que esto sea viable, los actuales operadores TDMA/IS-136 deben poner gran atención a CDMA como transición a 3G.

⁵ Personal communication, informed source, Seoul, May 29, 2001

1.7.6. El Camino de Migración para los Operadores TDMA/IS-136

Originalmente, la migración de TDMA/IS-136 a 3G iba de la mano con la de GSM a 3G. Los Operadores de TDMA habrían de sobreponer GPRS en su infraestructura TDMA. Según esto, ellos habrían de introducir una interfaz EDGE. Sin embargo, con la adopción de GSM por parte de AT&T, el camino de migración cambió. Actualmente, se supone que los operadores TDMA desplegarán una red GSM en su espectro asignado de 800 y/o 1900 MHz. Esta red iría paralela a su red TDMA establecida. Enseguida tomarían el camino de los operadores GSM y migrarían sus redes GSM a GPRS, posiblemente a EDGE, y finalmente a UMTS. Teóricamente, este cambio en el camino de migración permitiría a los operadores TDMA beneficiarse de los avances en I+D y economías de escala que benefician al mundo GSM.

En teoría, esta aproximación tiene sentido. Sin embargo, presenta al menos tres retos de implementación. Todos se aplican a los operadores Colombianos TDMA/IS-136 que operan en la banda de 800 MHz.

1. Los equipos GSM, actualmente, están disponibles sólo para los 900, 1800, y 1900 MHz. No existe en el momento infraestructura ni terminales disponibles para la banda de 800 MHz en la cual trabajan los operadores Colombianos TDMA/IS-136.
2. Debido al costo y complejidad, los constructores están en la incertidumbre de producir o no terminales AMPS-TDMA-GSM. Debido a los costos, los constructores de terminales sólo piensan ofrecer capacidad TDMA-GSM y no AMPS que es analógico⁶. Esto es un problema en el caso de los operadores Colombianos, los cuales no han extendido sus redes TDMA/IS-136 en áreas rurales.

Como se dijo anteriormente en Colombia las zonas rurales (Carreteras y municipios pequeños) y en zonas urbanas donde la calidad de las llamadas se degrada, los suscriptores pueden hacer un hand-off de TDMA a AMPS. Sin las capacidades analógicas los teléfonos GSM-TDMA no podrían realizar este hand-off. Como consecuencia, los operadores TDMA 800 MHz que escojan GSM deberán desplegar una cobertura GSM más densa (y por lo tanto más costosa).

3. Actualmente no hay una manera de trasladar el rico portafolio de servicios y aplicaciones GSM a una red TDMA/IS-136. Así, incluso con teléfonos multimodo GSM-TDMA, los suscriptores GSM no podrán usar sus servicios GSM cuando cambien a una red TDMA.

⁶ "Siemens Challenges U.S. Mobile Phone Market with GSM/TDMA Handset to Capitalize on Carriers' Siemens AG, Las Vegas, March 21, 2001.

1.7.7. CDMA2000 1X como alternativa para operadores TDMA/IS-136

Contrario a la adopción de GSM, la infraestructura y terminales CDMA2000 1X están disponibles para frecuencias de 800 y 1900 MHz. Todos los terminales CDMA2000 1X para 800 MHz tienen un modo analógico (AMPS), por esto puede asegurar cubrimiento en los sitios donde no existe cobertura digital, lo cual quiere decir que asegurarían el servicio a un usuario en cualquier parte de Colombia. Finalmente, la mayor eficiencia de CDMA2000 1X provee la capacidad para aplicaciones de mayor ancho de banda así como más canales de voz. Por estas razones, los operadores Colombianos TDMA/IS-136 pueden encontrar muy útil reevaluar las relaciones costo - beneficio que ofrece GSM por su gran cobertura mundial, contra CDMA y considerar CDMA para brindar servicios de 3G.

1.7.8. Comparación de los caminos de migración

El saturado espectro de los 800 MHz aumenta los desafíos de la ingeniería de RF para introducir una nueva tecnología que complemente o reemplace a TDMA/IS-136. Esto es igual para GSM o CDMAONE.

Para ingresar la nueva tecnología, la estructura de reuso celular de la red de TDMA debe ser desmontada mientras se introduce la nueva tecnología.

Debido a los problemas de interferencia y requerimiento de “bandas de guarda” CDMA podría necesitar una portadora de 1.8 MHz mientras GSM podría necesitar inicialmente 2.5 MHz. En teoría, CDMA necesita menos espectro, lo cual haría su despliegue inicial mucho más sencillo.

Las dificultades de ingeniería de tales despliegues se traducen directamente en un reto del mercado. Al remover canales de TDMA/IS-136 para soportar una nueva tecnología RF, los operadores corren el riesgo de degradar el servicio, lo cual sería un agravio para los usuarios.

1.7.8.1. El tiempo requerido para desarrollar y desplegar terminales GSM

Si la disponibilidad de infraestructura GSM 800 es crítica para los planes de la transición de los operadores TDMA/IS-136, la disponibilidad de teléfonos GSM 800 lo es aún más. Sin los teléfonos, las redes no pueden funcionar. Las redes inoperantes causan pérdidas a los operadores. Cuando los teléfonos estén disponibles, deberán ser totalmente funcionales. Si no, los usuarios los rechazarán, y no se materializarán ganancias para los operadores.

1.7.8.2. El despliegue de dispositivos CDMA2000 1X

En cambio, los dispositivos para CDMA2000 1X están en producción y están siendo usados en todas las redes Coreanas. A principios de Mayo del 2001, habían cerca de diez modelos de dispositivos disponibles de cuatro fabricantes diferentes. Samsung lidera el mercado con sus modelos SCH X100, X110, X120, X130, X200, y X1000, seguido de dos modelos de SK TeleTech, uno de LG, y uno de Motorola.

Al final del año 2001, se espera que otras compañías entren al mercado, incluyendo a Nokia. Juntos, producirán 26 modelos CDMA2000 1X adicionales, elevando el total de modelos a 36. Esta es una ventaja significativa sobre GSM 800.

La mayor variedad de dispositivos estimula la demanda del mercado. Además, hace que la mayoría de los constructores disminuyan sus precios, y esto a su vez estimula la demanda.

1.7.8.3. Compatibilidad con redes anteriores y costo total de la infraestructura

Al contrario del estándar Americano —AMPS, TDMA/IS-136, y CDMA— El estándar Europeo GSM siempre ha especificado las interfaces entre los centros de conmutación móvil y las estaciones base. Esto significa que los centros de conmutación móvil y las estaciones base GSM producidas por cualquier compañía pueden operar con las estaciones base y centros de conmutación móvil producidos por cualquier otra compañía.

Además, aunque el número total de proveedores de infraestructura CDMA sea mayor, los más importantes —principalmente Nokia, Siemens, y Alcatel—proveen más infraestructura GSM que infraestructura CDMA.

Como consecuencia, el precio nominal para la infraestructura GSM es menor que para la infraestructura CDMA.

Pero existen ventajas para la infraestructura CDMA que deben tenerse en cuenta. Entre ellas están:

1. La posibilidad de usar estaciones base CDMA con conmutadores TDMA/IS-136.

2. La posibilidad de incorporar CDMA en los subsistemas y plataformas de servicio de las redes TDMA. Esto podría incluir registros de ubicación de visitantes, correo de voz, y servicios de mensajes cortos (SMS), entre otros.

Estas posibles ventajas provienen de que TDMA/IS-136 y CDMA emplean una red de señalización común (ANSI-41 o American National Standards Institute 41). La red de señalización maneja los subsistemas y plataformas de servicio.

El grado hasta el que la nueva infraestructura CDMA pueda reutilizar las centrales de conmutación u otros elementos de la red TDMA/IS-136 dependería también del grado hasta el cual los proveedores de equipos hayan diseñado la interoperabilidad de sus equipos. Motorola, Samsung, y Ericsson, por ejemplo, producen estaciones base que se proyecta trabajen con centrales de conmutación producidos por Lucent y Nortel.

La discusión de compatibilidad con redes anteriores introduce el problema de desplegar GSM 800 en una red TDMA/IS-136 e integrar las dos tecnologías —en particular los sistemas de señalización MAP y ANSI-41. Aun cuando un operador TDMA decida montar una red GSM 800 completamente por separado, todavía necesitaría que las dos redes se comunicaran entre sí.

La necesidad más obvia estaría en el área de la facturación. ¿Puede integrarse el sistema de señalización MAP en un sistema ANSI-41 que maneje facturación?. Los operadores Colombianos correrían el riesgo de usar dos sistemas de facturación separados, uno para su red GSM 800 y el otro para su red TDMA. Además de los altísimos costos, se presentarían problemas como: ¿cómo darían los operadores una sola factura a los usuarios? ¿Y, si se requieren facturas separadas, cómo responderán los usuarios?

1.7.8.4. El costo de los terminales

El costo de los terminales ha probado ser el talón de Aquiles de las nuevas tecnologías móviles. Para cada nueva generación de tecnología, los altos costos iniciales de los terminales han retrasado su adopción. Solamente cuando los operadores subsidian los precios de los terminales, motiva a los usuarios a adoptar una nueva tecnología. Y sólo una economía y una producción de escala hace que los precios disminuyan. Esto se ha podido probar con GSM, TDMA/IS-136 (originalmente IS-54), y **CDMAONE**.

En el mercado se conoce que los precios de los terminales para nuevas tecnologías es mucho mayor que para tecnologías ya establecidas. También se sabe que mientras las tecnologías maduran, ganan economías y producción de escala y sus terminales bajan de precio.

Tabla 2. Precios de ventas totales de teléfonos móviles. Mercado de Estados Unidos, 1998-2000

Año	Tecnología		
	GSM (\$)	CDMA/IS-95 (\$)	Diferencia (\$)
1998	117	191	74
1999	89	135	46
2000	95	120	25

Estos datos nos muestran que de 1998 al 2000 el precio de los terminales GSM bajó de \$117 a \$95. Durante el mismo periodo, el precio de los terminales CDMA disminuyó de \$191 a \$120. La diferencia de precio entre terminales GSM y CDMA disminuyó de \$74 en 1998 a \$25 en el 2000. Entre 1999 y el 2000, el precio de los terminales CDMA cayó un 11%. Asumiendo que esta proporción de caída continúa, apunta a un precio promedio por terminal de \$106 durante el 2001. Este estimativo de \$106 para terminales CDMA está de acuerdo con los de fuentes como Ericsson cuyos terminales cuestan entre \$95 y \$110⁷ QUALCOMM cuyos terminales cuestan entre \$110 y \$140⁸ y Lucent cuyos terminales están entre \$100 y \$129⁹. Al usar el promedio obtenido y los precios usados por Ericsson, QUALCOMM, y Lucent, el precio promedio está en \$112.

Sin embargo, el interés principal está en el precio de los terminales CDMA2000 1X. Sprint ubica el precio unas decenas de dólares más que el precio de los equipos CDMA aproximadamente los terminales CDMA2000 1X tendrán un incremento de \$30 a \$50¹⁰. Sumados a los \$112 del terminal CDMA, indica que los terminales CDMA2000 1X tendrán un precio entre \$142 y \$162. Comparado con esto, Lucent reporta un precio de \$149 y Ericsson estima un precio entre \$130 y \$140. Los terminales CDMA2000 1X tendrán un valor promedio de \$145. Asumiendo un 11% de disminución en el costo, este podría descender a \$129 durante el año 2002.

Con respecto a los terminales GSM 800, Nokia es el más avanzado en su desarrollo. Nokia ha sido muy cauteloso con dar precios específicos. Sin embargo, afirma que : “Sabemos que podemos producir de manera rentable” un teléfono de banda dual GSM-TDMA por un valor cercano a \$200. Sin embargo, Nokia hace énfasis en que, dependiendo de la funcionalidad del teléfono, el precio inicial de este podría ser mayor o menor. Se puede deducir de esta afirmación que el precio será mayor a \$200.

En resumen, el precio de teléfonos GSM-TDMA será de \$200 o más comparado con el de los teléfonos CDMA2000 1X, el cual sería de \$129. La diferencia mínima de precio sería de \$71 aunque podría ser mucho mayor.

⁷ Personal communication, informed source, Ericsson, Inc., May 23, 2001.

⁸ Personal communication, Irwin Jacobs, CEO, QUALCOMM, Inc., San Diego, California, May 24,2001.

⁹ Personal communication, informed source, Lucent Technologies, May 21, 2001.

Por todas las razones dadas a lo largo de este capítulo se sustenta por que CDMA y comercialmente CDMA2000 1X es la solución más viable para los operadores Colombianos para empezar su migración a 3G. Decimos empezar pues con CDMA2000 1X no se logran las velocidades exigidas por la UIT para clasificarse dentro de 3G.

¹⁰ Personal communication, informed source, Sprint PCS, April 24, 2001.

2. ESTUDIO DE LA TÉCNICA DE ACCESO CDMA

En este capítulo se da una descripción de los principales conceptos de espectro ensanchado y del acceso múltiple por división de código aplicados a la telefonía móvil celular, creando una base conceptual para el desarrollo del proyecto.

2.1. CONCEPTOS DE ESPECTRO ENSANCHADO

La mayoría de los estudios y desarrollo de sistemas de comunicación digital, se han realizado tratando de emplear el ancho de banda del canal de comunicación disponible en forma óptima y con la menor potencia posible, teniendo en consideración la exigencia de calidad para un determinado servicio. Sin embargo otras consideraciones de calidad de comunicación como la inmunidad frente a interferencias o confidencialidad de las comunicaciones han sido menos consideradas. En la actualidad estos dos últimos aspectos han cobrado mucha importancia, y pueden ser alcanzados por medio de la técnica conocida como Modulación de Espectro Ensancho (*Spread Spectrum Modulation*).

La mayor ventaja de la modulación de espectro ensanchado es la alta inmunidad obtenida frente a interferencias casuales (usuarios que emplean el mismo canal) o frente a interferencias intencionales por parte de alguien que desea bloquear una comunicación en curso. Las principales características de esta técnica son las siguientes:

- La modulación de espectro ensanchado ocupa un ancho de banda mucho mayor que el mínimo requerido para que los datos sean transmitidos.
- El ensanchamiento de la señal transmitida se consigue con la suma binaria de esta, con otra señal pseudoaleatoria (código Walsh) que es independiente de la señal a transmitir.
- La recepción se realiza mediante el proceso de desensanche, el cual consiste en la suma binaria de la señal recibida con una señal local que es la réplica de la señal (código PN) empleada en la transmisión.

Las ventajas más importantes de los sistemas de modulación de espectro ensanchado son:

- Baja probabilidad de ser interceptada (LPI). Esto es debido al ensanchamiento del espectro que hace dificultosa la captación de las señales transmitidas por parte de un receptor ajeno a la comunicación.
- Alta inmunidad frente a la interferencia intencionada.
- Alta inmunidad frente a la interferencia de señales multitrayecto y uso de un mismo canal por dos o más usuarios.
- Posibilidad de acceso múltiple aleatorio, con lo cual es posible tener varios usuarios cursando comunicaciones independientes en el mismo canal.
- Privacidad de comunicaciones.

2.1.1. Principios de modulación en espectro ensanchado

En la transmisión vía radio, un flujo de bits enviado sobre un enlace requiere un ancho de banda definido para ser transmitido y recibido satisfactoriamente. El espectro real ocupado por señales digitales depende de su tasa de bits y el tipo de modulación de radio que emplee (como ASK, FSK, QPSK, QAM).

El mínimo ancho de banda utilizable, en Hertz, es aproximadamente igual a la tasa de información en bits por segundo. Sólo las formas más avanzadas de modulación logran esta densidad. Las técnicas comunes usan muchas veces tanto ancho de banda de radio como cantidad de información transmitida.

La mayor parte de la radio ha sido una serie de intentos por lograr comprimir la información en anchos de banda más pequeños, abriendo campo a un mayor número de usuarios. Sin embargo, CDMA explota un principio diferente llamado Transmisión en espectro ensanchado. Ver figura 7.

En la transmisión de espectro ensanchado, una señal se transmite usando mucho más ancho de banda de RF que el requerido, haciendo que la señal sea más fácil de detectar en el receptor (Ver figura 8.). Lo que representa una ventaja llamada "Ganancia de procesamiento", que se explica en el numeral 2.1.4. CDMA usa la ganancia de procesamiento para hacer el enlace de RF más fiable y usa codificación para permitir a múltiples usuarios compartir la misma señal de banda ancha.

El espectro ensanchado tiene sus orígenes en aplicaciones militares. La idea era proveer comunicaciones seguras. Actualmente, las aplicaciones comerciales utilizan varias formas de espectro ensanchado para:

- Disminuir los efectos de ruido espurio.

- Incrementar la capacidad del espectro existente.
- Mejorar las características de desempeño de las señales.

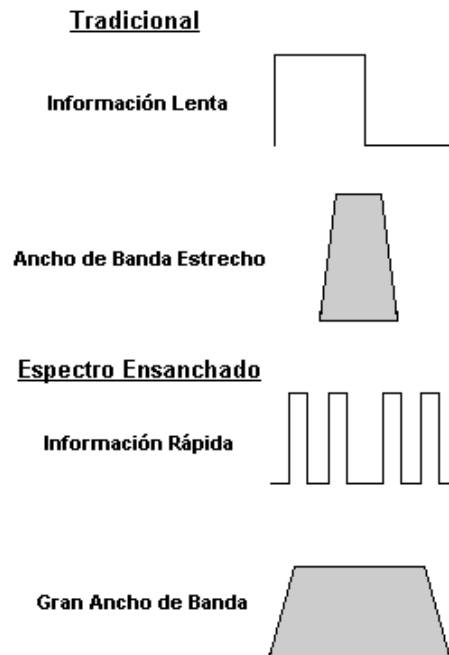


Figura 7. Principios de transmisión de radio digital

Visto en el Dominio de la Frecuencia

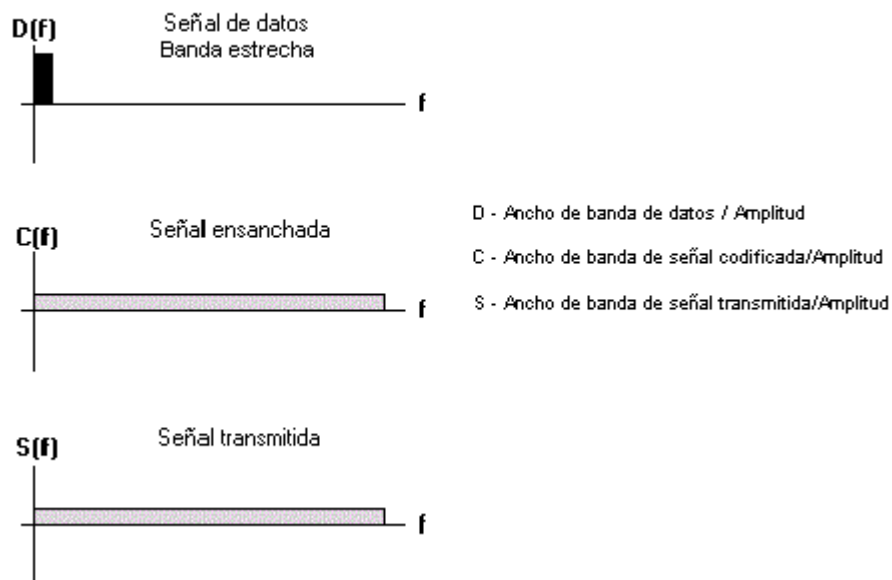


Figura 8. Conceptos de espectro ensanchado

2.1.2. Técnicas de espectro ensanchado

Existen varias técnicas de modulación de espectro ensanchado, las que se diferencian en el modo de ensanchamiento del espectro y el tipo de modulación que emplean, entre ellas se tiene:

2.1.2.1. Espectro Ensanchado por salto de Frecuencia (FH-SS. *Frequency Hopping Spread Spectrum*)

En FH-SS, el espectro disponible es dividido en un gran número de bandas de frecuencia, similar a FDMA pero sin fijar canales específicos y asignarlos a usuarios individuales. El transmisor salta de una frecuencia a otra en una secuencia rápida que varía de acuerdo a una señal obtenida de la multiplicación de la señal de datos $x(t)$ y una señal pseudoaleatoria (código PN). Los usuarios son diferenciados por una única secuencia de salto que le ha sido asignada (Ver figura 9 a.). En una aplicación típica de FH, se emplea una modulación MFSK.

Una desventaja de este método es que algunas veces dos o más usuarios pueden ocupar la misma frecuencia, causando interferencia por un corto periodo de tiempo. Idealmente, las secuencias deben ser diseñadas o planeadas de manera que en cualquier momento dos o más usuarios no ocupen la misma frecuencia. Esto es imposible considerando el número de usuarios que utilizan el sistema. Sin embargo, las secuencias deben ser diseñadas buscando la disminución de los problemas ya citados.

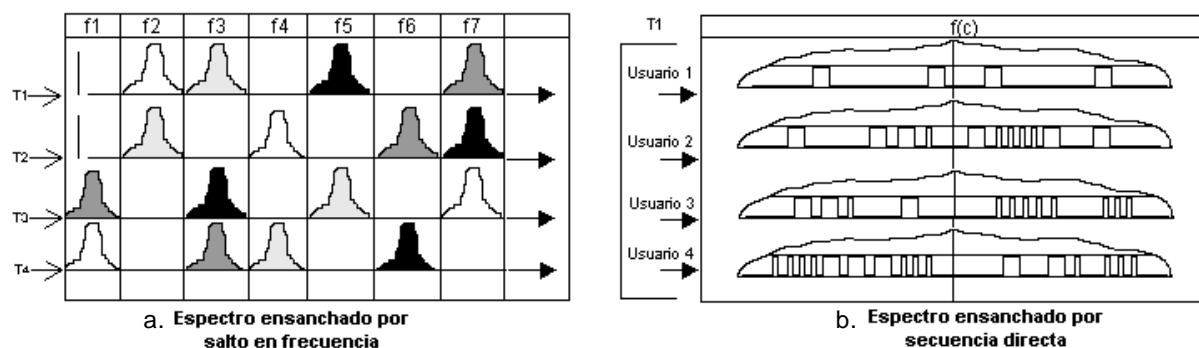


Figura 9. Técnicas de espectro ensanchado

2.1.2.2. Espectro ensanchado por secuencia directa (DS-SS. Direct Sequence Spread Spectrum)

El espectro ensanchado por secuencia directa (DS-SS. *Direct sequence spread spectrum*), figura 9b, ha sido mucho más utilizado hasta ahora. CDMA es la primera implementación comercial propuesta de gran escala. Aunque teóricamente fue posible desde hace muchos años, solo con los recientes avances de la tecnología VHSI (Muy alta escala de integración) se ha desarrollado siendo práctica y económica.

Los datos de entrada se ensanchan por una secuencia binaria de alta velocidad, resultando en una señal de gran ancho de banda. Esta secuencia de ensanchamiento es pseudoaleatoria y es descrita como una secuenciaseudoruidosa (PN. Pseudo-Noise) por que parece un ruido, ver figura 10.

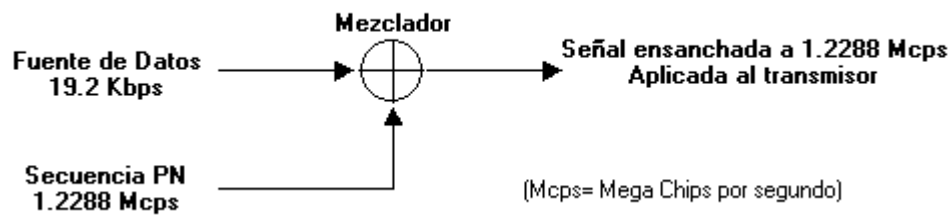


Figura 10. Técnica de generación para Espectro ensanchado en secuencia directa

La fuente de datos puede ser datos de usuario o símbolos representando datos (1 o 0 Digital) , dependiendo del método de codificación. Cualquier cosa que entre al mezclador, la salida es medida en tasa de chips. Cada cambio de estado (1 o 0) es un chip y la tasa de chips se define como la velocidad de la secuencia de ensanchamiento, no la velocidad del flujo de datos.

El ensanchamiento por secuencia directa no afecta la información de la fuente. Después de que la información fuente ha sido ensanchada, está contenida aún en la información transmitida. La información fuente simplemente se representa de una forma diferente. Para recuperar la información fuente, se aplica la secuencia correcta en el receptor para desenmascarar la información oculta por el código, ver figura 11.

Note que en la técnica DS-SS el nivel de potencia requerido para transmitir la información es significativamente menor del necesario que si la señal no se codificara. La única diferencia entre la señal codificada y no codificada es que ocupan diferentes porciones del espectro, ver figura 12.

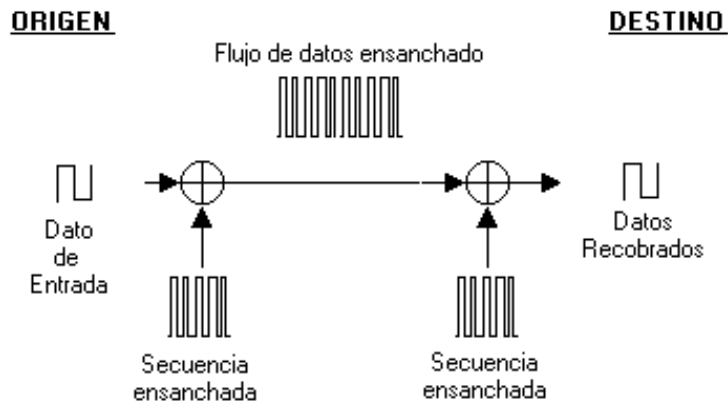


Figura 11. Principio de ensanchamiento CDMA

La señal resultante puede ser desensanchada y el flujo de datos recuperado si la secuencia de ensanchamiento original está disponible y adecuadamente sincronizada. Después del desensanche, el flujo de datos original se recupera intacto.

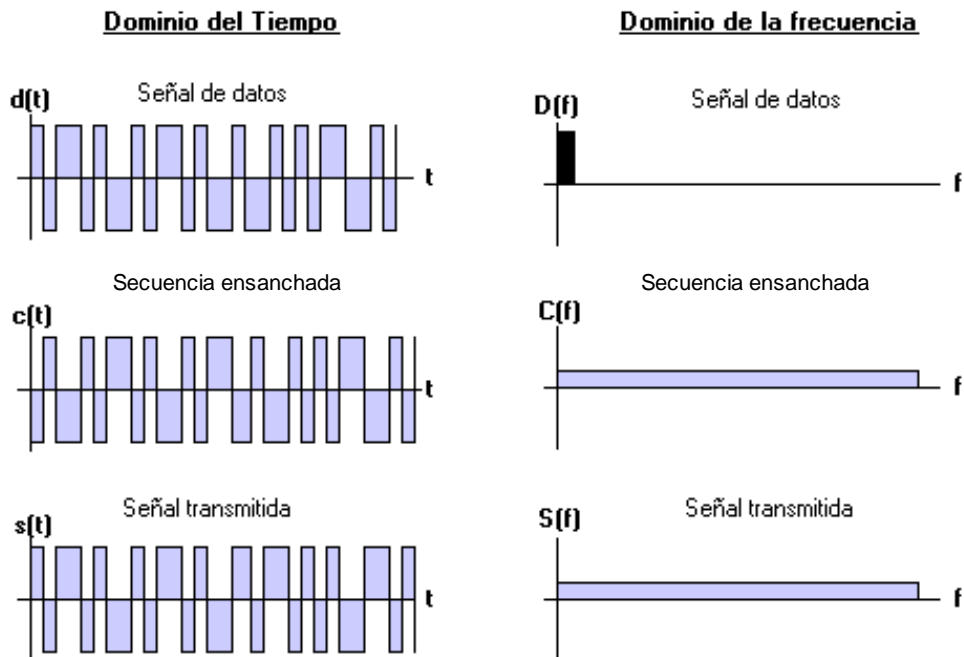


Figura 12. Ejemplo de espectro ensanchado directo

2.1.2.3 Espectro ensanchado por saltos de tiempo (TH-SS. *Time Hopping Spread Spectrum*)

En esta técnica a cada pulso de información $x(t)$ se le asigna un intervalo de tiempo dentro del intervalo de operación denominado "Intervalo de salto". Durante este, la información es transmitida en ráfagas de acuerdo a un plan de saltos preestablecido, definido por un código PN (Ver figura 13.). El TH-SS puede ser considerado como el equivalente de los saltos de frecuencia pero realizado sobre ranuras de tiempo en vez de frecuencias. El proceso de selección de la ubicación del pulso de información corresponde a una modulación de posición de pulso PPM.

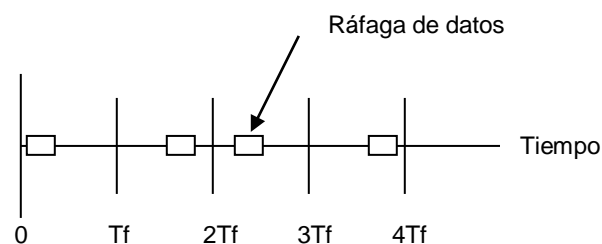


Figura 13. Espectro ensanchado por saltos de tiempo TH-SS

2.1.3. Ganancia de procesamiento de espectro ensanchado

La ganancia de procesamiento es la ganancia en la relación señal a ruido efectiva resultado del proceso de desensache. Esta ganancia es directamente proporcional a la cantidad de espectro utilizado dividido por la tasa de datos transmitida. Esta da a CDMA una ventaja sobre los sistemas tradicionales de espectro no ensanchado. La tabla 3 muestra un ejemplo de la estructura de ganancia celular entre un sistema CDMA y un sistema TDMA, como referencia se toman los anchos de banda dados en los estándares IS-95 para CDMA e IS-54/IS-136 para TDMA, para una misma tasa de bits. La tabla 4 muestra ventajas de ganancia de procesamiento de CDMA sobre TDMA.

Tabla 3. Comparación de ganancia de procesamiento de CDMA contra TDMA

Sistema	Ancho de banda (BW)	Tasa de bits (Rb)	Ganancia de procesamiento
CDMA	1.23 MHz	10 Kbps	$10 \text{ Log}(1230/10) = 20.9 \text{ dB}$
TDMA	30 KHz	10 Kbps	$10 \text{ Log}(30/10) = 4.7 \text{ dB}$

En la tabla 3, la ventaja de CDMA es de $20.9-4.7=16.2 \text{ dB}$. Este ejemplo implica solamente un usuario en el sistema CDMA. Doblar el número de usuarios CDMA reduce la ventaja 3 dB. Con 16 usuarios, CDMA aún tiene 4 dB de ventaja sobre TDMA. Este ejemplo se pensó para demostrar

solamente la ganancia de procesamiento que se produce del desensanchamiento. No considera otras características de CDMA como son la velocidad variable.

Tabla 4. Ventajas de ganancia de procesamiento de CDMA sobre TDMA

Usuarios CDMA	Ventaja de Procesamiento
1	16.2 dB
2	13.2 dB
4	10.2 dB
8	7.2 dB
16	4.2 dB

2.2. CONCEPTOS DE CDMA

CDMA es un esquema en el cual múltiples usuarios son asignados a una fuente de radio usando técnicas de espectro ensanchado con secuencia directa (DS-SS). A pesar de que todos los usuarios están transmitiendo en la misma banda de RF, los usuarios individualmente están separados unos de otros al usar códigos ortogonales (ver anexo A). El estándar norteamericano CDMA o IS-95, especifica que cada usuario lleva información de banda base a 9.6 Kbps (Tasa fijada en 1), la cual es la tasa de salida del vocoder. La tasa de la señal ensanchada final es de 1.2288 Mcps, resultando en un ancho de banda de RF de aproximadamente 1.25 MHz.

Pueden haber muchas señales de 1.25 MHz presentes en la misma banda de RF. Para un alto grado de funcionamiento de un sistema CDMA, se limita la interferencia. Esto significa que la capacidad y calidad del sistema está limitada por la cantidad de nivel de interferencia presente en la banda. La capacidad se define como el número total de usuarios simultáneos que el sistema puede soportar, y la calidad se define como la condición percibida de un enlace de radio asignado a un usuario particular; esta calidad percibida del enlace está directamente relacionada a la probabilidad de error de bit o tasa de error de bit (BER).

2.2.1. Control de potencia

El control de potencia es esencial para el buen funcionamiento de un sistema CDMA. Debido a que todos los usuarios comparten la misma banda RF a través del uso de códigos PN, cada usuario percibe un ruido aleatorio de otros usuarios. La potencia de cada usuario individual, por lo tanto, debe ser cuidadosamente controlada para que ningún usuario esté interfiriendo innecesariamente con otros, quienes están compartiendo la misma banda.

Para ilustrar la importancia del control de potencia en CDMA, se considera una sola celda que tiene dos usuarios hipotéticos (ver figura 14). Se examina el caso del enlace de reversa, ya que este es frecuentemente el enlace limitante en CDMA. El usuario 2 está más cerca a la estación base que el usuario 1. Si no hay control de potencia, ambos usuarios transmitirían una cantidad fija de potencia p_t ; sin embargo, debido a la diferencia en la distancia, la potencia recibida del usuario 2, o $p_{r,2}$, sería más grande que la potencia recibida del usuario 1 o $p_{r,1}$. Si se asume que la diferencia de distancia es tal que $p_{r,2}$ es 10 veces más que $p_{r,1}$, entonces el usuario 1 estaría en una gran desventaja.

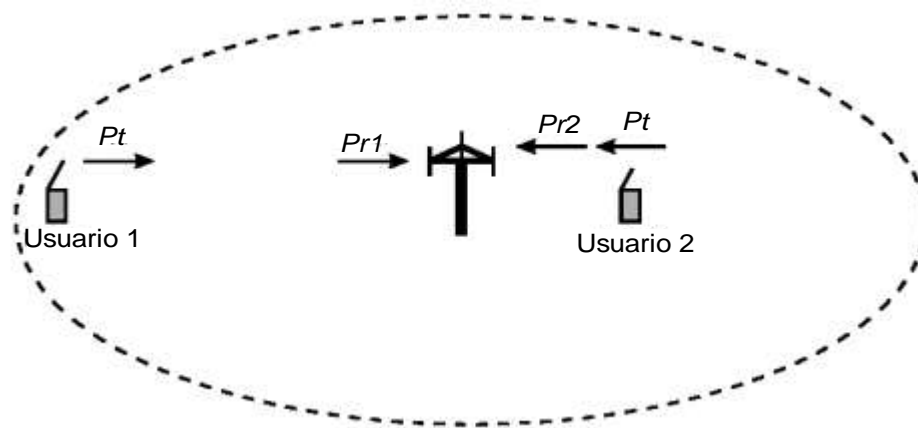


Figura 14. Una estación base con dos usuarios hipotéticos. Cada usuario está transmitiendo a la estación base una cantidad fija de potencia p_t .

Si la S/N requerida, es (1/10), entonces inmediatamente se puede ver la disparidad entre las S/Ns de los dos usuarios. La figura 15 ilustra este punto; si se ignora el ruido térmico, entonces la SNR del usuario 2, $(S/N)_2$, sería 10, y la SNR del usuario 1, $(S/N)_1$, sería (1/10). El usuario 2 tiene una S/N mucho más alta y así disfruta de una calidad de voz superior, pero la S/N del usuario 1 escasamente cumple con la S/N requerida. Esta inequidad es conocida como el problema cerca-lejos en un sistema de acceso múltiple de espectro ensanchado.

Se dice que en este punto el sistema tiene que alcanzar su capacidad. La razón es que si se intenta adicionar un tercer usuario transmitiendo p_t , en cualquier lugar de la celda, entonces la S/N de ese tercer usuario no sería capaz de alcanzar la S/N requerida, además, causaría que la S/N del usuario 2 caiga por debajo de la S/N requerida.

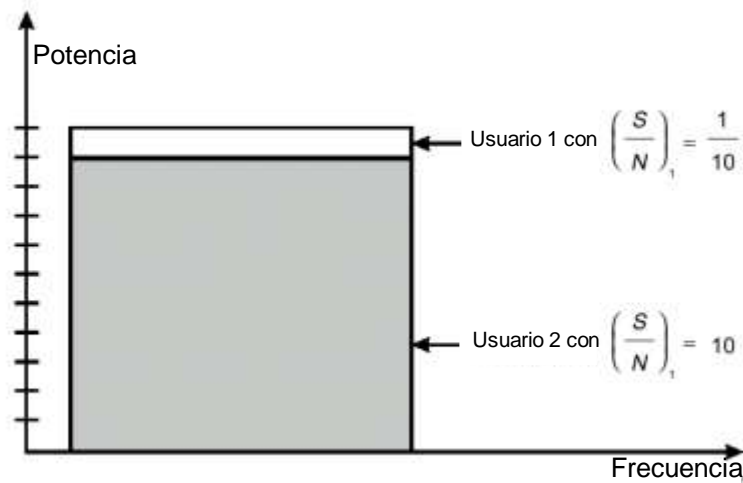


Figura 15. Potencia recibida en la estación base proveniente de dos usuarios. El usuario 2 tiene una más alta S/N que el usuario 1.

El control de potencia se implementa para superar el problema cerca-lejos y para maximizar la capacidad del sistema. El control de potencia es de tal forma, que la potencia recibida de cada usuario en la estación base es igual. La figura 16 ilustra este concepto. En la celda, si se realiza este control de potencia percibiendo de cada usuario la misma potencia p_r en la estación base, el sistema puede acomodar un grupo más grande de usuarios. Como continuación del ejemplo anterior, si la S/N requerida aun es $(1/10)$, entonces en la celda se puede soportar un total de 11 usuarios. La capacidad es maximizada con el uso del control de potencia (ver figura 17).

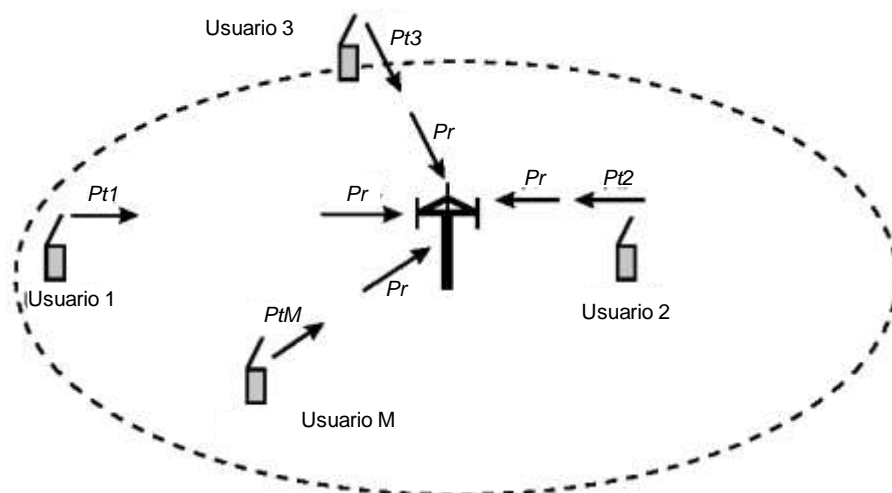


Figura 16. Control de potencia.

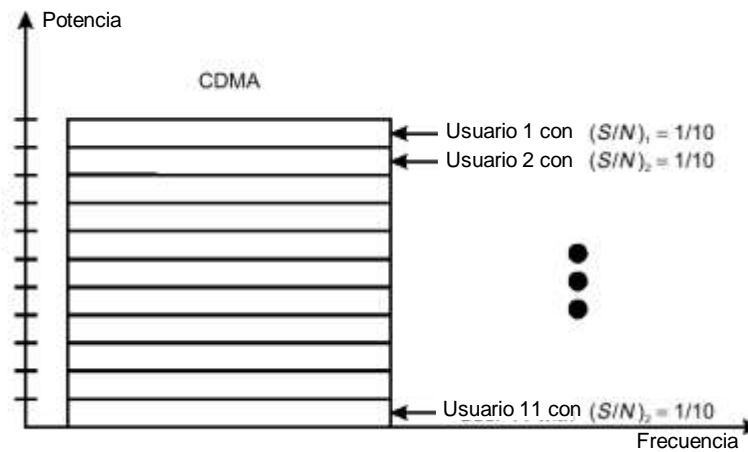


Figura 17. Se maximiza la capacidad cuando las potencias recibidas de todos los usuarios son iguales en la estación base.

2.2.2 Handoff

En un ambiente de comunicaciones móviles, cuando un usuario se mueve dentro del área de cobertura de una estación base al área de cobertura de otra estación base, debe ocurrir la transmisión del enlace de comunicación de una estación base a la siguiente. El sistema CDMA como es definido por IS-95 proporciona diferentes procesos de handoff.

El primero es el *soft handoff*. Durante el handoff, un móvil simultáneamente mantiene conexión con dos o tres estaciones base. Como el móvil se mueve dentro de su celda actual (celda anfitriona) a la próxima celda (celda destino), se mantiene simultáneamente una conexión del canal de tráfico con ambas celdas. La figura 18(a) y la figura 18(b) ilustran los enlaces simultáneos durante el soft handoff. En el enlace delantero (ver figura 18(a)), el móvil demodula las dos señales de dos estaciones base diferente. Las dos señales están combinadas para producir una señal compuesta de mejor calidad. En el enlace de reversa (ver figura 18 (b)), la señal transmitida por el móvil es recibida por ambas estaciones base. Las dos celdas demodulan la señal separadamente y envían las tramas demoduladas de vuelta al centro de conmutación móvil CCM. El CCM contiene un selector que elige la mejor trama.

El segundo es el *softer handoff*. Este tipo de handoff ocurre cuando un móvil transmite entre dos sectores diferentes de la misma celda. En el enlace delantero, el móvil realiza la misma clase de combinación de procesos que en el soft handoff. En este caso, el móvil usa su receptor para combinar las señales recibidas de dos sectores diferentes. En el enlace de reversa, sin embargo,

dos sectores de la misma celda reciben simultáneamente dos señales del móvil. Las señales son demoduladas y combinadas dentro de la celda, y solamente una trama es enviada de regreso al CCM.

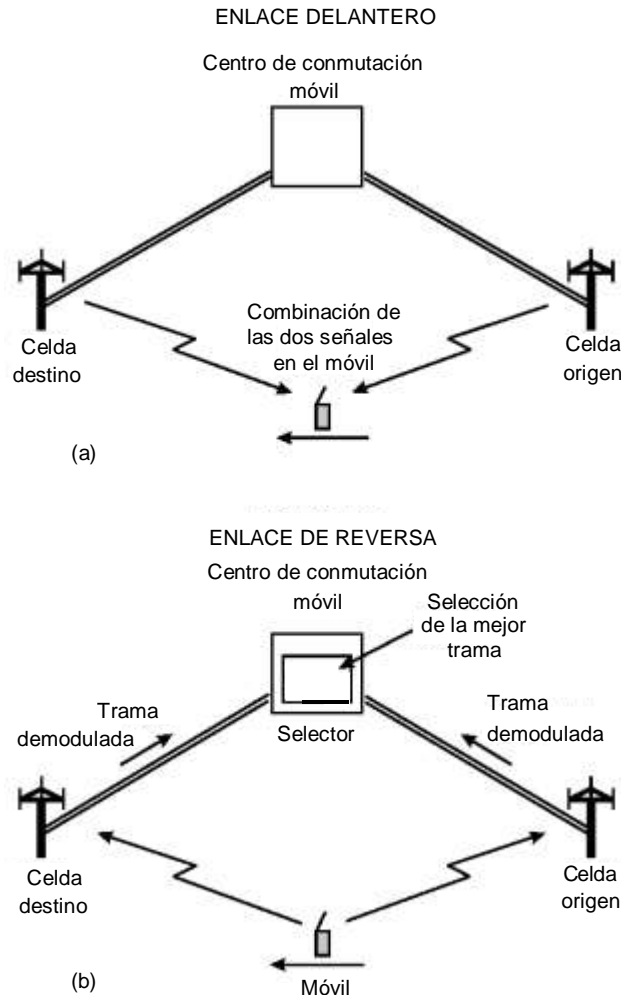


Figura 18. (a) Soft handoff entre dos estaciones base – enlace delantero;
(b) Soft handoff entre dos estaciones base – enlace de reversa.

La tercera clase de handoff es el *hard handoff*. El sistema CDMA usa dos tipos de hard handoff. El hard handoff CDMA a CDMA ocurre cuando el móvil está pasando entre dos portadoras CDMA (p.e, dos canales de espectro ensanchado que están centrados en diferentes frecuencias). Este hard handoff también puede ocurrir cuando el móvil está pasando entre dos operadores de diferentes sistemas. El handoff de CDMA a CDMA algunas veces es llamado D-to-D handoff. Por otra parte, el hard handoff de CDMA a analógico ocurre cuando una llamada CDMA es atendida en una red analógica. Esto ocurre cuando un móvil está viajando dentro de un área donde hay

servicio analógico pero no servicio CDMA. El hard handoff de CDMA a analógico algunas veces es llamado D-to-A handoff.

Antes de describir el proceso de soft handoff en detalle, es importante notar que cada sector en un sistema CDMA se distingue de otro por el canal piloto de ese sector. Como muestra la figura 19, el canal piloto es uno de los tres canales de control (piloto, paging, y sincronización) en el enlace delantero. El canal piloto sirve como una “guía” y ayuda al móvil en la adquisición de otro canal de control y/o de tráfico del mismo sector. No hay otra información contenida en el piloto mas que el código corto PN con un offset asignado específicamente para un sector en particular. Una secuencia de código corto PN con un offset llega a ser otra secuencia PN, y esta secuencia PN con offset es ortogonal a la secuencia original. El código PN transmitido sobre el canal piloto usa esta cualidad para distinguirse a sí mismo de otros sectores y otras estaciones base

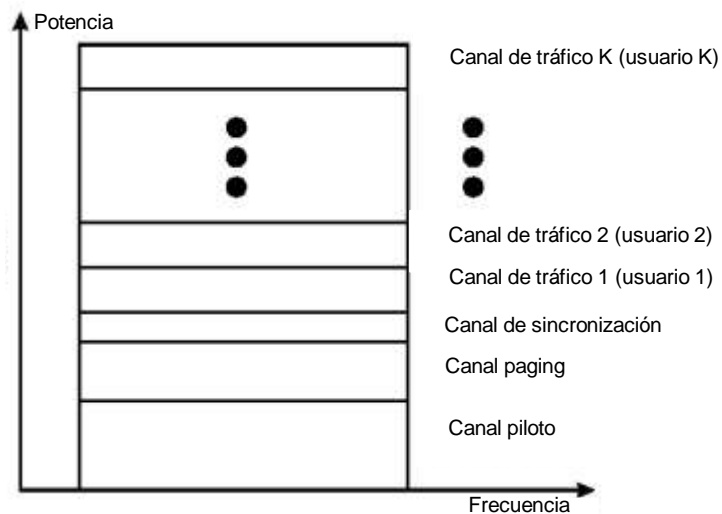


Figura 19. Señal de espectro ensanchado (SS) del enlace delantero de CDMA

Para describir la S/N del canal piloto se usa un término especial: energía por chip por densidad de interferencia, o E_c/I_o . La energía por chip E_c se diferencia de la energía de bit E_b en que los “chips” se refieren a las secuencias PN que son ensanchadas. Ya que el canal piloto no contiene información de banda base, no se descomprime y los bits no son recuperados. Por lo tanto, para describir la intensidad de la señal del canal piloto, se usa la S/N o la E_c/I_o . Note que ya que el piloto no es descomprimido, la E_c/I_o se mantiene menor que 1 la mayor parte del tiempo.

2.2.3. Canales CDMA

Es posible expandir y comprimir información aplicando y removiendo múltiples secuencias de ensanchamiento. Los sistemas CDMA usan tres secuencias especiales de ensanchamiento, cada una con las propiedades deseadas de código, ensanchamiento y recuperación de la información transmitida de cada usuario. Ver tabla 5.

Tabla 5. Tres secuencias de ensanchamiento

Tipo de secuencia	Función en el enlace hacia adelante	Función en el enlace de reversa	Número	Longitud	Propiedades especiales
Códigos Walsh	Identificación de usuario dentro de la celda	Confiabilidad en la información del portador, Trojan Horse	64	64 chips 1/19, 200 seg.	Mutuamente ortogonal
Secuencia PN corta	Distinguir celdas y sectores	Ensanchamiento en cuadratura (offset cero)	1 (I & O)	32,768 chips 26-2/3 ms 75x in 2 seg.	Ortogonal con si mismo en cualquier valor del tiempo
Código largo de usuario	Srambling de datos para evitar unos o ceros	Distinguir usuarios, permitir la recuperación de la señal	Uno por teléfono	242chips ~40 días	Casi ortogonal

2.2.4. Codificación ortogonal del canal

Durante la codificación ortogonal del canal, como se muestra en la figura 20, ocurre la siguiente secuencia:

- Las funciones ortogonales como flujos de datos o secuencias binarias cuyos productos tienen promedios cero, son independientes y no relacionadas.
- Dos secuencias de bits dadas son ortogonales si el resultado de la OR exclusiva les da un número igual de unos y ceros.
- Los códigos Walsh son mutuamente ortogonales.
- La secuencia corta PN es en sí misma ortogonal en cualquier cadena mayor que cero.
- Se usan códigos largos no ortogonales, pero suficientemente diferentes para usarlos a nivel general.

En CDMA, la secuencia usada para ensanchar una señal dada es ortogonal a todas las otras secuencias usadas (ver anexo A). El producto de cualquier par de muestras ortogonales es aproximadamente igual a cero y son independientes unas de otras. Esta independencia es explotada en los sistemas CDMA para minimizar la interferencia entre usuarios, permitiendo así,

que más de un usuario comparta la misma frecuencia. El inicio de la función Walsh se usa para codificar/decodificar el ensanchamiento/desensanchamiento de la señal.

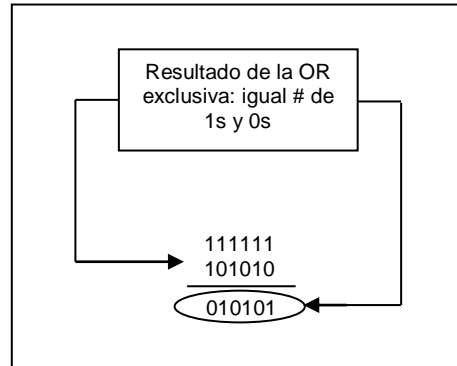


Figura 20. Codificación ortogonal del canal

La salida del proceso de ensanchamiento es una secuencia de símbolos llamados chips. Un símbolo es un bit de dato de usuario que ha sido librado de error. En el receptor, la señal es muestreada sobre un intervalo de tiempo de un símbolo ensanchado. Si se aplica el código correcto, la suma de la potencia sobre la ventana muestreada aún con pequeños errores, es suficiente para generar el símbolo original.

Un bit de dato (símbolo) es una OR-exclusiva cruzada con una secuencia ortogonal de 64 bits. Cada bit de la función y el resultado del patrón son llamados chip, distinguiéndose de un bit real de información. Ver figura 21.

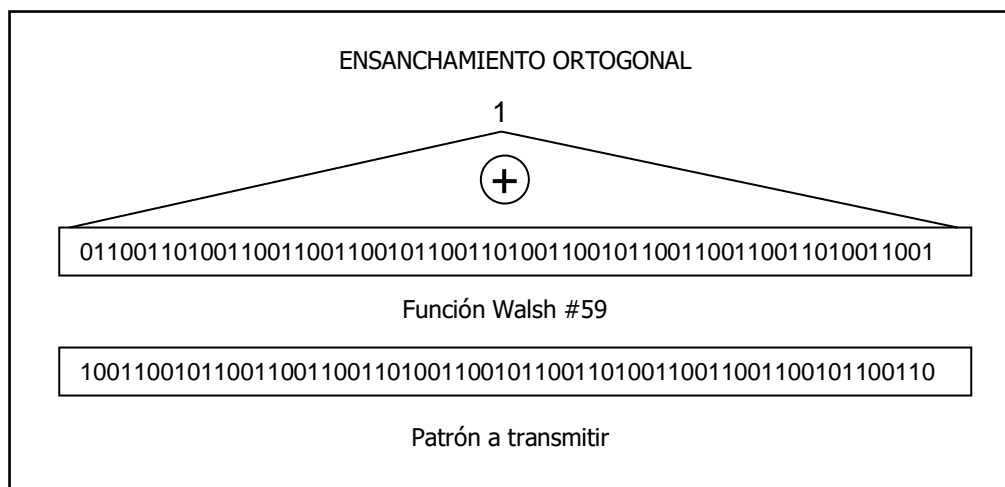


Figura 21. Ensanchamiento ortogonal del patrón transmitido.

La correcta función Walsh aplicada sobre el receptor produce un solo valor, como es el bit de dato original. El desensanchamiento produce la salida de un bit de dato por una secuencia de entrada de 64-chip a los demoduladores. Ver figura 22.

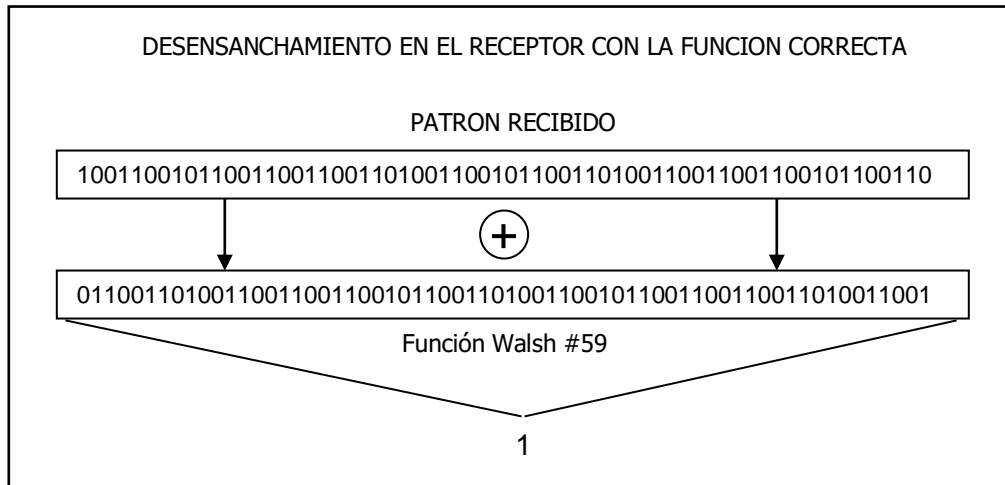


Figura 22. Desensanchamiento ortogonal del patrón recibido.

Una función incorrecta produce resultados engañosos (igual número de ceros y de unos). Del mismo modo, los patrones resultantes de cualquier otra función no corresponden a los que se obtienen al aplicar una función Walsh. La codificación ortogonal asegura que sólo se descomprime el canal correcto. Ver figura 23.

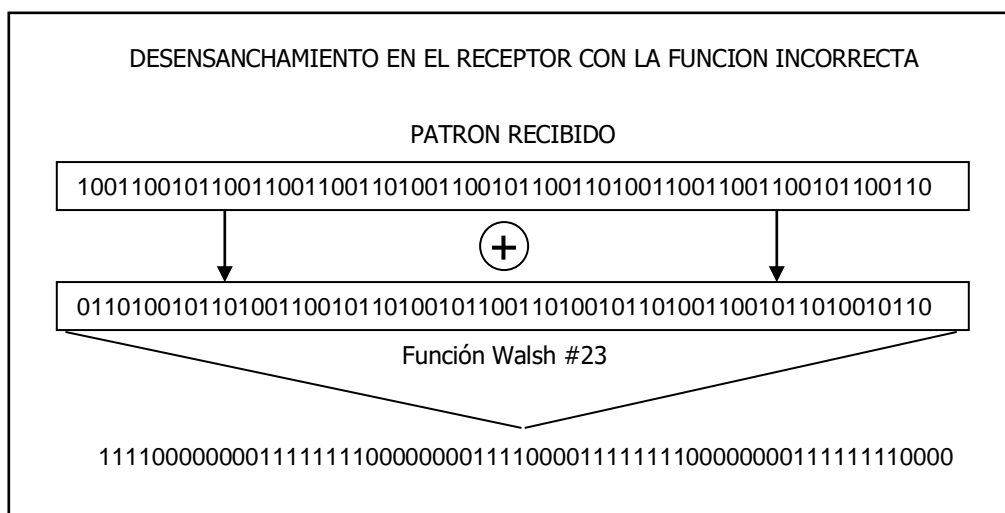


Figura 23. Desensanchamiento ortogonal del patrón recibido con una función incorrecta.

2.2.5. Codificación ortogonal del canal usando el inicio del código Walsh

Las funciones Walsh son asignadas con base en las llamadas. La secuencia Walsh aísla al usuario del enlace hacia adelante (forward) de otros usuarios. Esto los divide por códigos sobre el espectro disponible. Hay 64 funciones ortogonales. Ver figura 24.

La función de Walsh se aplica a la señal del canal de tráfico hacia adelante (forward) en la estación base. La estación móvil es responsable por detectar y descomprimir la señal correcta. El receptor de la estación móvil está habilitado únicamente para recuperar la señal aplicando la función Walsh correcta.

El desensanchamiento es un proceso que integra los resultados de la función Walsh al patrón recibido, en un tiempo especificado. El desensanchamiento correcto resulta al recuperar el bit de dato original con toda la potencia de la señal. La función Walsh incorrectamente aplicada al tráfico del canal hacia adelante produce una señal que no puede ser reconocida por la unidad móvil. En el proceso de desensanchamiento, todos los canales excepto el canal correcto aparece con ruido de fondo.

Secuencia de pseudo ruido

La secuencia de pseudo ruido (PN) tiene una longitud de 32768 chips y es un vector bidimensional. Esta secuencia se correlaciona perfectamente con sí misma, cuando se compara con un periodo offset de 0 chips. La secuencia PN corta, figura 25, es una secuencia especial que es ortogonal cuando se compara con sí misma usando un periodo offset diferente de cero.

Código largo de usuario

Cada código largo de usuario es de 242 chips de longitud. Generado en 1.2288 Mcps, el código requiere 40.4 días para completar un ciclo. Cada teléfono tiene un único código largo de usuario generado al usar sus 32 bits ESN, una máscara de usuario de 10 bits para definir el operador, y el tiempo del flujo de chips del sistema, expresado como un número binario de 42 bits.

Los códigos largos de usuario, figura 26, no son exactamente ortogonales pero son lo suficientemente diferentes para permitir una decodificación fiable sobre el enlace de reversa (reverse link).

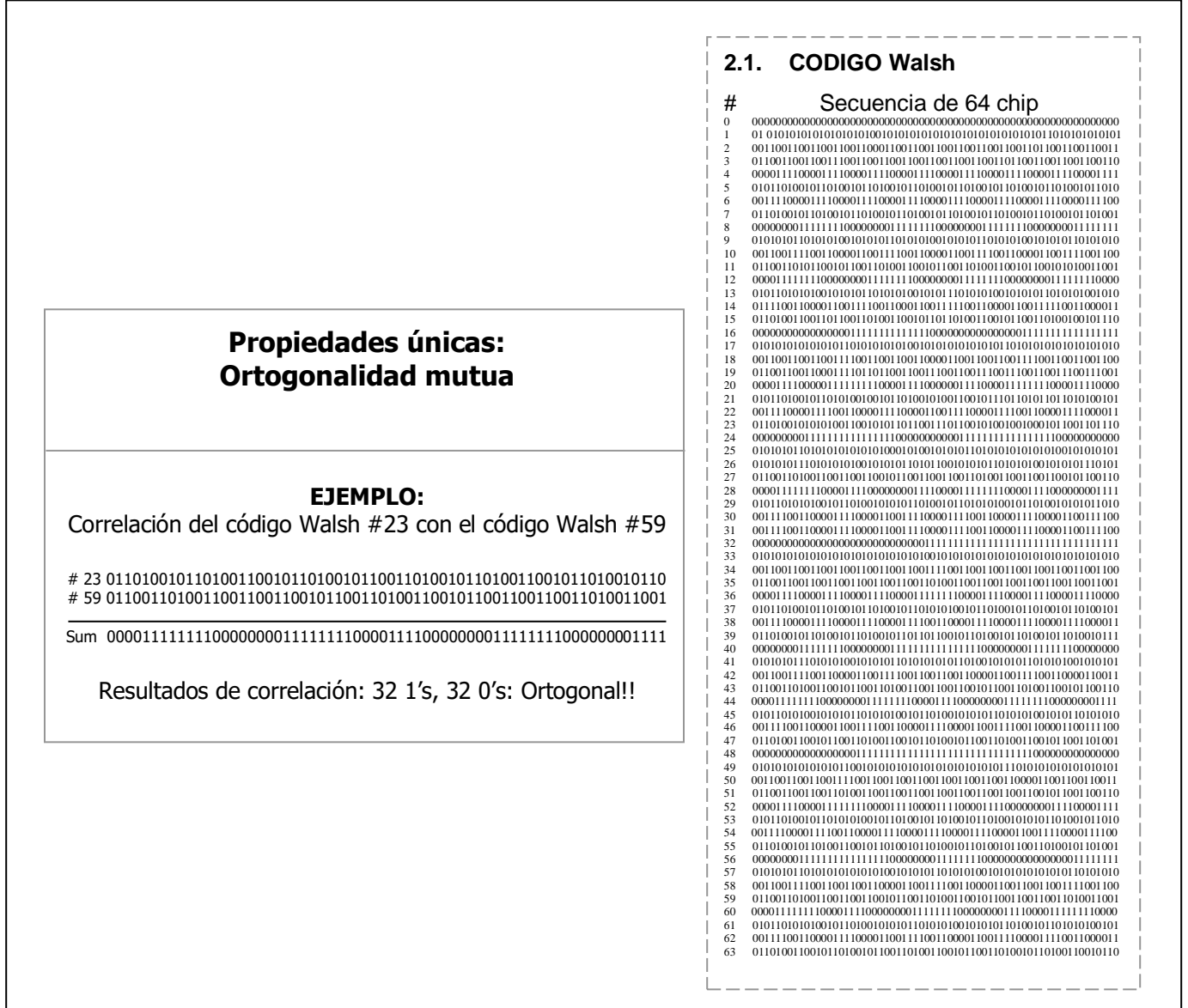


Figura 24. Herramienta número uno para ensanchamiento: Código Walsh

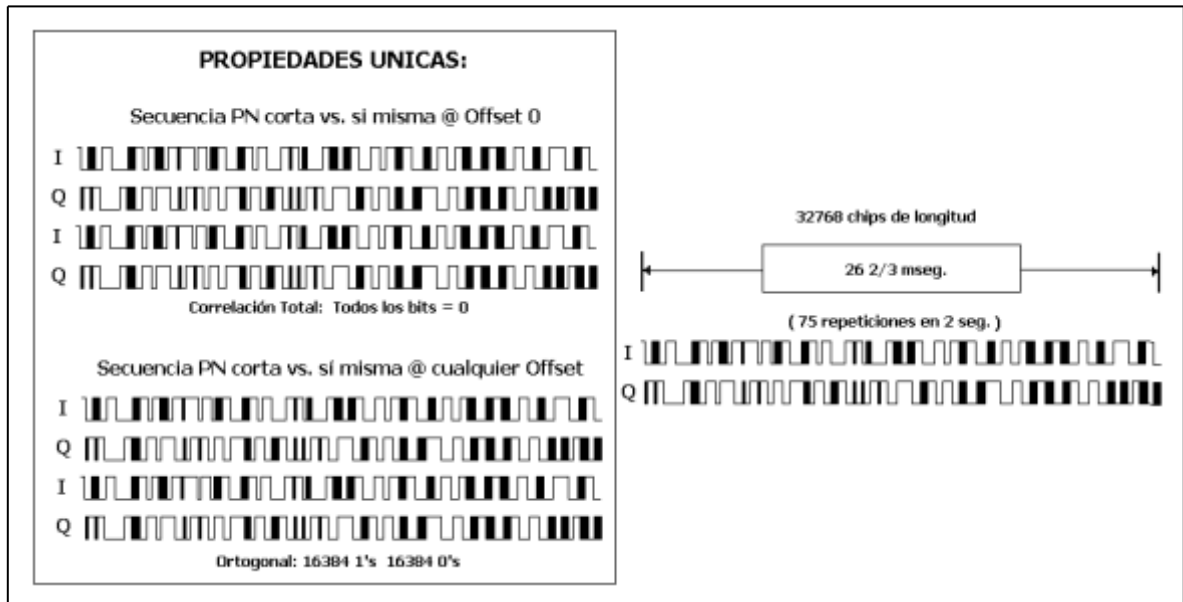


Figura 25. Secuencia PN corta

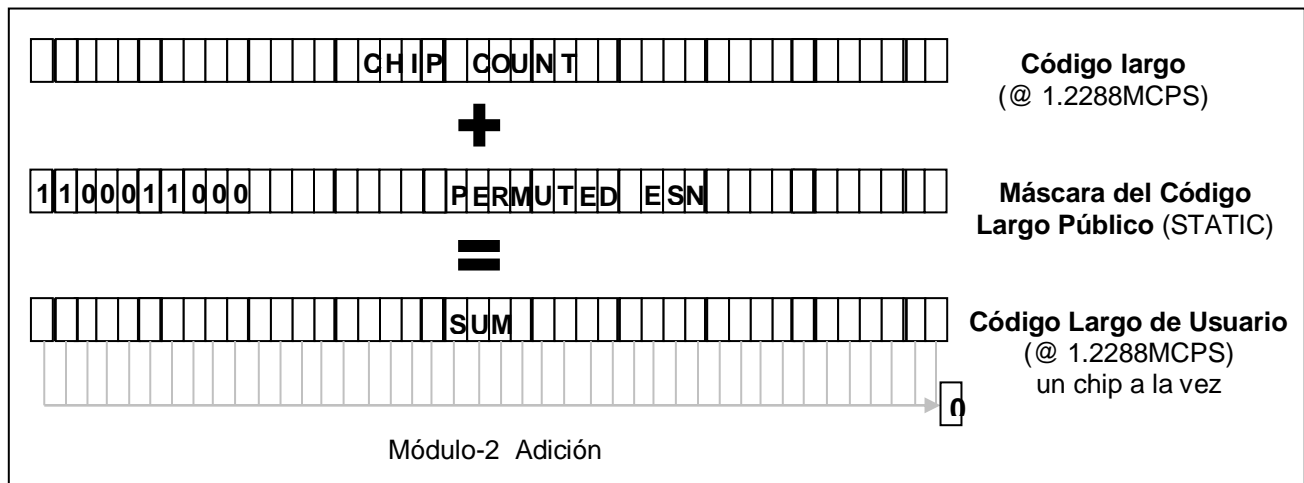


Figura 26. Código largo de usuario

2.2.6. Canales delanteros en CDMA

Todos los canales de una portadora en una celda o un sector usan la misma frecuencia. Cada canal usa el código Walsh asignado. Las señales provenientes de otras celdas son tratadas usando el código PN corto, pero con un periodo offset diferente en cada celda.

Para recuperar una señal individual, el usuario celular compara el periodo offset PN para extraer la señal de la celda, entonces el adecuado código Walsh selecciona el usuario deseado del flujo digital.

A continuación se listan las características de las señales del canal delantero y se ilustran en la figura 27.

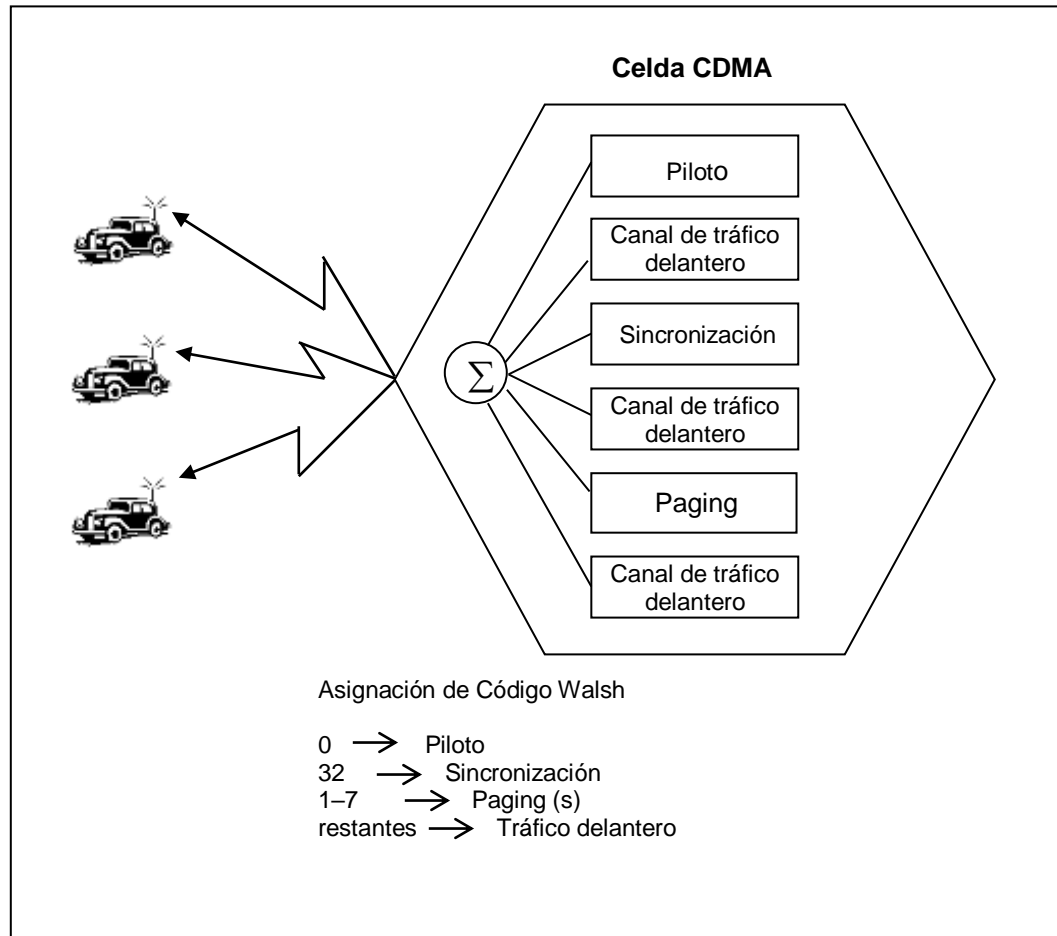


Figura 27. Canales delanteros en CDMA

- Canal piloto: usado por el móvil para entrar al sistema identificándose como candidato para el handoff.
- Canal de tráfico delantero: usado para la transmisión del usuario e información de señalización a una estación móvil durante una llamada.
- Canal de sincronización: usado para proporcionar los parámetros esenciales del sistema.
- Canal paging: usado por la estación base para transmitir información de encabezamiento del sistema y mensajes específicos a la estación móvil.

La ubicación del código PN (Pseudo Noise) en la celda, con su offset particular, constituye una firma de identidad única. Mientras que un canal de control puede volver a utilizarse en otro lugar dentro de un sistema AMPS/D-AMPS, un sistema CDMA proporciona la mejor capacidad de asignación de pilotos, mas allá de cualquier requerimiento típico.

Dado que el tráfico del canal delantero emplea la misma frecuencia, la estación móvil debe cumplir con la tarea crítica de discriminar si el tráfico proviene de esta o de otras estaciones móviles. Este proceso también es requerido para los mensajes de encabezamiento provenientes de la estación base. Una buena analogía para el tráfico del canal delantero, es cuando en un cuarto con mucha gente y con ruido, se empiezan a dar instrucciones y otros mensajes al personal, de tal forma que éste debe escuchar la información de su interés.

2.2.7. Canales de reversa en CDMA

Los usuarios usan su propio canal de tráfico. Este se identifica por la longitud de la secuencia de código del usuario. Los canales de acceso inician la comunicación con la estación base por el registro, la iniciación de llamada, la respuesta a paging y por otras señales anteriores a la llamada (ver anexo C). Los offsets de los códigos Walsh y de los códigos PN cortos no se usan para separar a los usuarios del enlace de reversa (reverse), ésta es la función de los códigos largos de usuario.

A continuación se presentan las características para las señales de los canales de reversa en CDMA.

- Canal de tráfico de reversa: soporta tráfico de voz de usuario y tráfico bidireccional de encabezamiento entre la estación base y la estación móvil cuando una llamada está en curso.
- Canal de acceso: usado por la estación móvil para iniciar la comunicación con la estación base y responder a un mensaje de paging.

Como en el canal delantero, todos los móviles transmiten en la misma frecuencia. Una clave de distinción es la que hace diferente a los móviles, los cuales escuchan una sola transmisión de la estación base, la estación base tiene que procesar múltiples transmisiones provenientes de muchas estaciones móviles. Usando la analogía del cuarto lleno de gente, esto es como una persona tomando mensajes de muchas personas al mismo tiempo. Para desarrollar esta tarea se utiliza una temporización exacta y se emplean métodos de identificación.

Cada una de las secuencias de ensanchamiento de CDMA se usan con un propósito específico sobre en enlace ascendente y descendente.

2.3. BENEFICIOS Y VENTAJAS DE CDMA

CDMA ofrece muchos beneficios y ventajas muy llamativos para fabricantes y operadores de sistemas celulares sin mencionar a los usuarios. Algunas características y beneficios de CDMA se listan en la tabla 6.

Tabla 6. Características y beneficios de CDMA

Característica	Beneficio
Espectro expandido	<ul style="list-style-type: none">• Incrementa la capacidad del sistema• Codificación Digital• Privacidad inherente
Control de potencia	<ul style="list-style-type: none">• Baja interferencia• Extensión de la vida de la batería• Incremento de la capacidad del sistema• Unidades móviles más pequeñas
Vocoder de tasa variable	<ul style="list-style-type: none">• Mejora la calidad de voz• Detección de voz• Reducción de la interferencia
Reutilización de frecuencia	<ul style="list-style-type: none">• Incremento de la capacidad del sistema
Hand-off asistido por el móvil	<ul style="list-style-type: none">• Mejora el hand-off• Mejora la calidad de voz
Procesamiento multi-trayectoria	<ul style="list-style-type: none">• Reduce la interferencia debida a las múltiples trayectorias• Incrementa la calidad de voz

▪ Privacidad

Con los códigos PN (pseudo-random noise) usados para codificar la señal CDMA –y aproximadamente 4.4 trillones diferentes de códigos usados indistintamente- existe poca oportunidad de que la conversación sea “espiada”. En el canal de transmisión delantero, no es posible extraer una conversación determinada sin poseer el correspondiente código. En el canal de reversa, la señal puede ser decodificada únicamente usando un demodulador CDMA de estación base, el cual no está disponible al público.

▪ Unidades móviles pequeñas, ligeras y con mayor duración de baterías

Debido a los beneficios de CDMA en su control de potencia, y la tasa variable de los vocoder, las unidades móviles pueden transmitir en niveles de potencia mucho menores que los utilizados en AMPS y TDMA. El control de potencia permite que la unidad mantenga una transmisión de calidad mientras que utiliza el mínimo nivel de potencia posible. La tasa de transmisión variable del

vocoder permite que la unidad reduzca las transmisiones en situaciones de tráfico bajo reduciendo así la potencia promedio consumida. Estas características combinadas resultan en una unidad más pequeña y liviana.

- **La planeación de frecuencias se hace más fácil**

Las tecnologías actuales hacen la planeación de frecuencias extremadamente complicada, dado que el planificador debe considerar que dos celdas adyacentes no pueden utilizar las mismas frecuencias. Con CDMA, todos los usuarios toman la misma frecuencia y son separados sólo por el código. Dado que la codificación digital elimina la interferencia co-canal, la misma portadora CDMA puede ser usada en celdas adyacentes.

- **Mayor capacidad**

En campos de prueba bastante amplios, CDMA ha demostrado su habilidad para ofrecer capacidades 8 y 20 veces mayores que AMPS. Teóricamente la capacidad máxima de este sistema esta limitada por el máximo número de códigos, pero realmente, la capacidad está directamente relacionada con el nivel de interferencia que se presenta en el sistema CDMA. Cualquier cosa que permita reducir la interferencia en el sistema, incrementará su capacidad. Los sistemas CDMA utilizan vocoders de tasa variable para variar la tasa de transmisión de uno a cuatro niveles. Cuando la actividad de voz es baja, el vocoder reduce su tasa de transmisión para reducir la interferencia e incrementar la capacidad del sistema.

- **Hand-off mejorado**

La innovación del hand-off "*soft*" y "*softer*" contribuye al mejoramiento de la calidad de voz. Esta característica reduce dramáticamente la posibilidad de pérdida de llamadas durante el hand-off.

Soft hand-off permite que dos o mas celdas sirvan temporalmente a un móvil durante el hand-off, por tanto, la unidad móvil se conecta a la segunda celda antes de romper la conexión con la primera. Esta estrategia asegura que la llamada es transferida y elimina el estado "mudo" que normalmente tiene lugar durante el hand-off.

Softer hand-offs permiten a la unidad móvil ser atendidas por dos sectores de la misma celda durante un hand-off dentro de la misma celda.

- **Mejoramiento de la calidad de voz y de llamada**

La tasa variable del vocoder no sólo permite incrementar la capacidad sino que también decrementa el ruido de fondo, incrementando la calidad de voz. Cambiando el umbral decodificable con relación al nivel de ruido, se puede alcanzar una alta calidad de voz en un ambiente ruidoso.

▪ **Resistencia a interferencias por multipletrayectoria**

CDMA transmite totalmente en una banda de 1.25 MHz, haciendo la transmisión resistente a la interferencia. La interferencia es tratada como un incremento del ruido de fondo por el sistema CDMA, el cual reacciona incrementando la potencia de transmisión y manteniendo la calidad. Los efectos de ecos en la señal debido a las múltiples trayectorias degradan la señal, sin embargo, el sistema CDMA usa este efecto a su favor. El receptor RAKE es el encargado de solucionar este problema, haciendo que las señales creadas por las múltiples trayectorias sean correlacionadas y combinadas para crear una única señal. Esto se traduce en transmisiones de alta calidad.

▪ **Reducción de interferencia**

Las redes CDMA reducen la interferencia a través de la transmisión digital de la señal, detección de la actividad de voz y control de la potencia de la señal transmitida. Los vocoders de tasa variable, reducen la interferencia cuando decrementan la tasa de transmisión en situaciones de poca actividad. Mediante el uso del control dinámico de potencia, la señal es transmitida con el nivel de potencia mínimo requerido (dentro de la relación señal/interferencia determinada). Como resultado se tiene una reducción apreciable en la interferencia entre canales y el mantenimiento de un nivel de error consistente y aceptable.

Tabla 7. Capacidad relativa de CDMA

Capacidad relativa de CDMA				
	AMPS	IS-54 (TDMA-3)	IS-95A CDMA (Vocoder de 8Kbs)	IS-95A CDMA (Vocoder de 13Kbs)
Ancho de banda celular	12.5 MHz	12.5 MHz	12.5 MHz	12.5 MHz
Re-uso de frecuencias	n=7	n=7	n=1	n=1
Ancho de banda portadora	0.03 MHz	0.03 MHz	1.25 MHz	1.25 MHz
#Portadoras por ancho de banda celular	12.5/0.03=416	12.5/0.03=416	12.5/1.25=10	12.5/1.25=10
#portadoras por celda	416/7=59	416/7=59	10/1=10	10/1=10
Canales de voz por portadora	1	3	20	15
Sectores por celda	3	3	3	3
# Portadoras por sector	57/3=19	57/3=19	10	10
Canales de voz por sector	1x19=19	3x19=57	20x10=200	15x10=150
Llamadas por celda	19x3=57	57x3=171	200x3=600	150x3=450
Capacidad	1x	3x	10x	8x

3. DIMENSIONAMIENTO DE LA RED

Este capítulo trata los métodos a seguir para la introducción de portadoras CDMA en un ambiente TDMA, considerando sus ventajas y desventajas así como la mejor relación costo-beneficio que estas brindan. Además aquí se determina el número de estaciones base necesarias en la fase inicial de una red CDMA teniendo en cuenta factores propios de Ingeniería de tráfico telefónico.

3.1 PREPARACION DE DATOS

Durante el proceso de preparación, se han obtenido datos e informaciones requeridas para empezar el diseño. Esto incluye determinar la disponibilidad de la información e iniciar una búsqueda de datos donde sea necesario.

Los pasos de preparación requieren información de 3 elementos principales:

1. **Terreno:** En este proyecto se ha escogido un escenario que cumple con las condiciones necesarias para su desarrollo. El lugar escogido es la ciudad de Santiago de Cali en el departamento del Valle del Cauca, la tercera ciudad más importante del país y que por su alto número de usuarios móviles celulares, elevado número de estaciones base y tráfico telefónico móvil cursado en crecimiento, además de su cercanía con la ciudad de Popayán presenta condiciones ideales para el desarrollo del proyecto.

La ciudad de Cali posee una población de más de 1.500.000 personas, está ubicada a 1000 metros sobre el nivel del mar y presenta una gran ventaja para los estudios de RF pues en su mayoría es plana exceptuando la zona occidental que presenta concentraciones humanas en terrenos elevados.

Por este motivo en este proyecto vamos a asumir que la ciudad de Cali se encuentra sobre una zona plana para facilitar el trabajo de Ingeniería.

2. **Mapas:** Los mapas muestran autopistas, calles, límites políticos, etc. que son necesarios a la hora de diseñar las redes. Idealmente se debería contar con mapas digitalizados y herramientas software de predicción, pero no es posible trabajar con ellas por su altísimo costo. Por eso se decidió trabajar con mapas a escala 1:20.000 que nos permiten observar las características más importantes de la ciudad.

En nuestro proyecto se contempla la utilización de los recursos existentes para mejoramiento de la capacidad y prestación de servicios. Uno de los recursos más importantes sino el más importante de un sistema de radio es el espectro electromagnético. Por este motivo al planear la migración de la red TDMA Colombiana hacia un sistema CDMA es necesario realizar un estudio sobre cual es el mejor método para reutilizar las frecuencias existentes asignadas a los operadores encontrando la solución más eficiente, económica y que produzca menos inconvenientes a los usuarios actuales.

Como económicamente no es posible para las compañías operadoras celulares cambiar toda la red que poseen, se comienza utilizando una sola portadora CDMA (A medida que aumente el número de usuarios se incrementará el número de portadoras). Para adicionar CDMA a un sistema AMPS/TDMA, el espectro debe ser despejado para cada portadora equipada con CDMA (Figura 28). Las celdas equipadas con CDMA y sus celdas vecinas deben ser clareadas o limpiadas un ancho de banda total de 1.77 MHz para la portadora CDMA inicial (1.23 MHz mas la banda de guarda de cada lado $2 \times 270\text{MHz} = 1.77 \text{ MHz}$). Las subsecuentes portadoras adyacentes CDMA no requieren bandas de guarda.

En el sistema celular Colombiano, con $N=7$, (donde N es el factor de reutilización de frecuencia o número de frecuencias por cluster o sector celular), esto equivale a la remoción de 42 canales de radio que servirán para tráfico telefónico más 18 canales de guarda.

Para la ubicación de la primera portadora CDMA se han considerado los siguiente casos:

3.2 MIGRACION DEL PLAN DE FRECUENCIAS

El objetivo de esta sección es liberar canales para una primera portadora CDMA manteniendo la capacidad de tráfico telefónico actual en la red TDMA y la mejor calidad de servicio posible.

Existen tres posibles soluciones que permitirían la ubicación de la primera portadora CDMA (ver figura 29), a continuación se van a tratar sus ventajas y desventajas así como sus configuraciones

3.2.1 Patrón de reuso $n=6$

Esta solución consiste en reducir el cluster de 7 celdas como actualmente posee la red celular Colombiana a 6 celdas por cluster (ver figura 30). Lo cual significa canales disponibles para la implantación de una portadora CDMA.

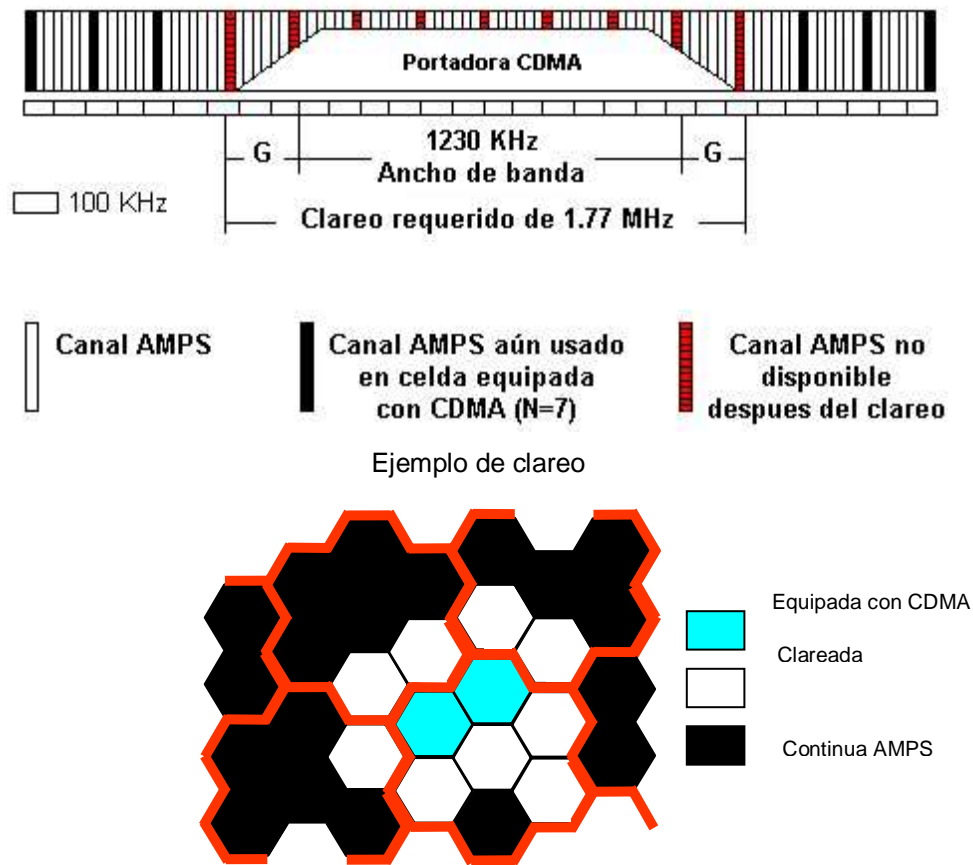


Figura 28. Liberación del espectro

3.2.1.1 Impacto de la solución n=6

VENTAJAS:

Se conoce la proyección de tráfico telefónico y se liberan 59 canales para la primera portadora CDMA. Es decir se conoce con cuantos usuarios va a empezar la nueva red.

DESVENTAJAS:

- Se tiene que modificar toda la red.
- Es necesario borrar el registro de configuración de la red actual y crear uno nuevo.
- No se conoce el mínimo requerimiento de separación de 21 canales en el combinador. Esto significa trabajo adicional con las operaciones para distribuir frecuencias entre combinadores o posible adquisición de nuevos combinadores de RF.
- El proceso de optimización es muy largo.
- Se espera un impacto notorio en la calidad de voz y desempeño observado por los usuarios.
- Si se necesita una segunda portadora CDMA, será necesario reevaluar el plan de frecuencias.

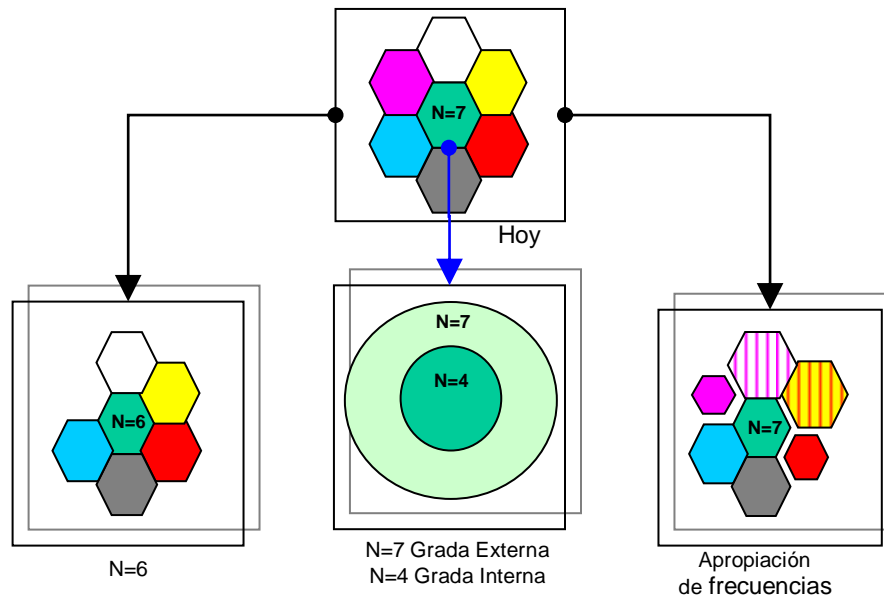


Figura 29. Posibles soluciones a migración del plan de frecuencias

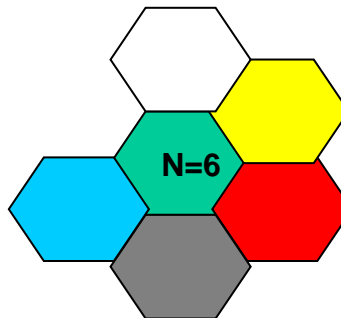


Figura 30. Patrón de reuso N=6

Numero de canales AMPS	: 416
Canales a liberar para CDMA	: 59
Canales de Control	: 36
Canales CDPD	: 18
Canales de Voz AMPS	:303
Número de Canales por Sector	: 16.83

3.2.2 N=7 parte exterior y N=4 parte interior o Solución de grada

Este método consiste en introducir clusters de 4 celdas en el interior de los clusters de 7 celdas (ver figura 31), es decir, usar patrones de distribución de frecuencias diferentes dentro de los clusters que actualmente utiliza la red celular Colombiana.

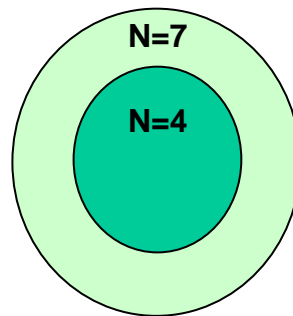


Figura 31. Solución de grada

Numero de Canales	AMPS	:416
Canales a liberar para CDMA		: 59
Canales de Control		: 42
Canales CDPD		: 21
Canales de Voz AMPS		:294
Canales AMPS N=4		: 84
Canales AMPS N=7		:210
Número de canales por sector : 17.0		

3.2.2.1 Impacto de la solución de grada

VENTAJAS:

- La proyección de tráfico telefónico es conocida y se liberan 59 canales para la primera portadora CDMA.
- Hace fácil liberar canales para otra portadora CDMA.
- Se espera un impacto moderado en la calidad de voz y el desempeño observado por los usuarios.
- La interferencia se vuelve adaptativa dependiendo de los requerimientos.

DESVENTAJAS:

- Hay un posible efecto de reuso cercano N=4.
- El dimensionamiento de tráfico de grada requiere constante monitoréo y diseño complejo.
- No se conoce el requerimiento de separación mínima de 21 canales en el combinador de RF, en N=4, sin embargo es posible distribuir frecuencias entre los combinadores.
- Es necesario tratar con dos planes de frecuencias, uno para N=7 y otro para N=4.

- No se ha determinado el impacto de las características en la capacidad del centro de conmutación móvil.

3.2.3 Apropiación de frecuencias

Esta solución consiste en liberar poco a poco, con el tiempo las frecuencias que se necesitarán para ubicar la primera portadora CDMA lo cual debe hacerse con mucho cuidado y teniendo un monitoréo continuo del tráfico telefónico para que no se disminuya el grado de servicio de la red (Figura 32).

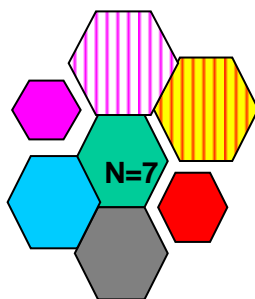


Figura. 32. Apropiación de frecuencias

Número de Canales AMPS	:	416
Canales a liberar para CDMA	:	59
Canales de Control	:	42
Canales CDPD	:	21
Canales de Voz AMPS	:	294

Número de Canales por Sector: Depende de los Requerimientos.

Debido a que el número de canales por sector depende de los requerimientos, el operador está en capacidad de liberar los canales que crea convenientes y de colocarlos en caso que se disminuya el grado de servicio.

3.2.3.1 Impacto de la solución de apropiación de frecuencias

VENTAJAS:

- No se requiere inversión ni recursos adicionales.

DESVENTAJAS:

- No es seguro conocer las proyecciones de tráfico telefónico especialmente en las zonas de alta congestión.

- La planeación de frecuencias es incierta y depende de los recursos disponibles en el momento del requerimiento.
- Es necesario implementar nuevas herramientas para monitorear la asignación de frecuencias.
- En caso de que no existan recursos disponibles se necesitaría una nueva celda.

Por todas las razones anteriormente mostradas y comparándolas unas con otras se decidió proponer como solución la **Apropiación de frecuencias** por las siguientes razones:

- Presenta una moderada disminución en la calidad de voz a los usuarios.
- El bloqueo de llamadas depende de la cantidad de canales que se hayan liberado. En caso de que el grado de servicio exigido por el ministerio de comunicaciones sea sobrepasado, se puede hacer uso de los canales anteriormente liberados sin ningún problema.
- La caída de llamadas sería mínima debido a que en su mayoría esto sucede por razones de interferencia. Al liberar los mismos canales en todas las celdas se reduce la posibilidad de interferencia y así mismo la de caída de llamadas aumentando el grado de servicio.
- Lo más importante es que es la solución más económica, pues aunque requiere un periodo de estudio de tráfico telefónico y evaluaciones de C/I no requiere de modificación ni adquisición del hardware existente.

La configuración del cluster para la solución N=6, se muestra en la figura 33.

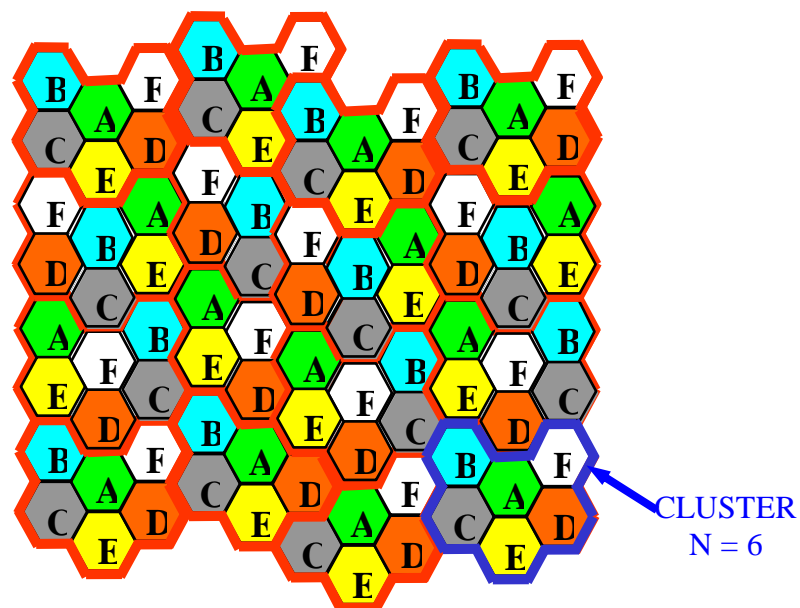


Figura 33. Configuración N=6

La configuración del cluster para la solución de grada, se muestra en la figura 34.

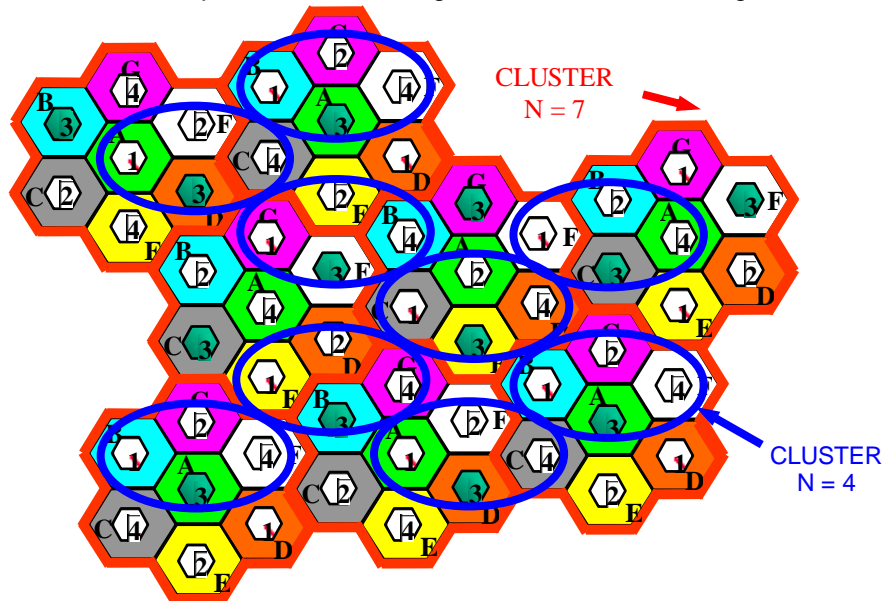


Figura 34. Configuración N=4 y N=7

La figura 35, muestra la configuración del cluster para la apropiación de frecuencias.

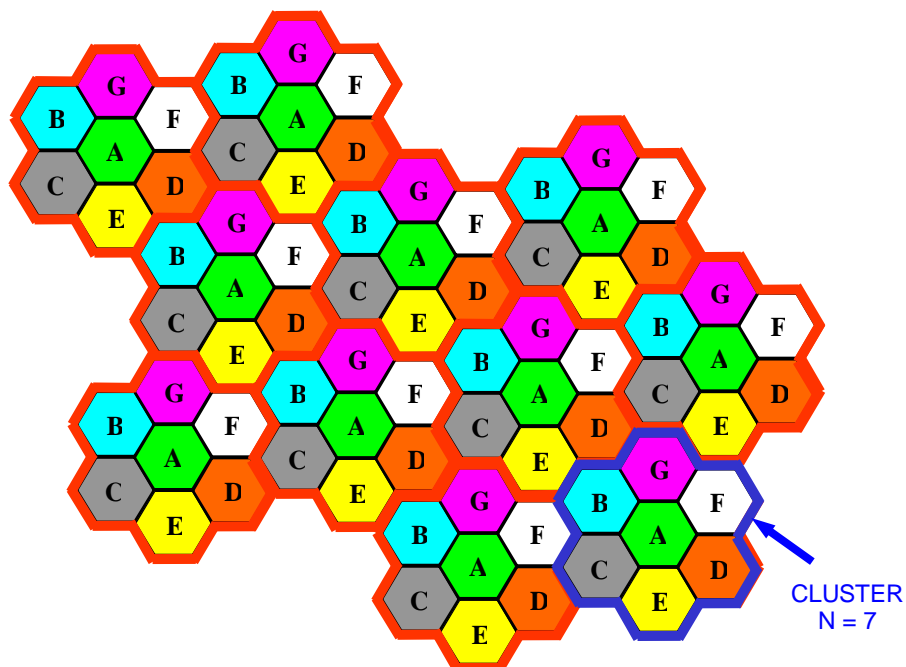


Figura 35. Configuración N=7, apropiación de frecuencias

En la tabla 8, se muestra un resumen de las principales características de las diferentes soluciones de migración de frecuencias.

DIMENSIONAMIENTO DE LA RED

		N=6	N=7 Combinado con N=4	Apropiación de Frecuencias
Usuarios	Empeoramiento Calidad de Voz	Fuerte	Moderado	Moderado
	Bloqueo de Acceso	Depende del número de canales Instalados en cada sector.	Depende del número de canales Instalados en cada sector y la configuración de las celdas (cell-tiering)	Depende de la Disponibilidad de los recursos
	Caída de Llamadas	Debe haber un notorio incremento En la caída de Llamadas.	Podría haber un moderado Incremento en la caída de Llamadas.	Podría haber un moderado Incremento en la caída De Llamadas, dependiendo Del plan de apropiación de frecuencias
	Preparación	Requiere un mayor tiempo y más Recursos para recolectar Información de toda la red	Menor tiempo y menos recursos Para recolectar información De una parte de la red	Requiere un moderado periodo de Tiempo y recursos
	Análisis y Diseño	Requiere estudiar la totalidad De la red enfocándose en los Datos de C/I y C/A.	Requiere estudio y constante monitoreo De la distribución de tráfico Requiere conocimiento del impacto De las características en la capacidad del switch.	Requiere estudio y monitoreo de los Requerimientos de tráfico Y evaluación de Los datos C/I y el C/A.
RED	Implementación	Requiere modificación de hardware, registro de configuración de la red y frecuencias en toda la red.	Requiere modificación del registro de configuración de la red de algunas frecuencias de voz	Depende del crecimiento y distribución Del tráfico, y frecuencias disponibles
	Ejecución	Resintonizar toda la red Y modificación de hardware	Modificación de hardware en algunas celdas. Resintonización de algunos canales De voz.	Ejecución progresiva dependiendo De los requerimientos de tráfico
	Optimización	Empieza casi desde el principio	Llevada a cabo dentro del proceso De optimización actual.	Llevada a cabo en el camino

3.3. LIBERACION DE CANALES

Se va a trabajar este proyecto con datos conseguidos de la empresa de telefonía celular Bellsouth que opera en la banda B (Ver uso del espectro celular Figura 2. Capitulo 1) a nivel nacional, es decir, este mismo proceso puede aplicarse en las principales ciudades del país donde se concentra el mayor tráfico telefónico (ver tabla 9).

Tabla 9. Distribución de frecuencias en la banda B celular.

TDMA Con 21 Grupos + 3 Grupos Comodines

Slot	Grupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0	ACCH	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357
1	LCR																								
2	DLR																								
3	1	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381
4	2	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405
5	3	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429
6	4	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453
7	5	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477
8	6	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501
9	7	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525
10	8	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549
11	9	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573
12	10	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597
13	11	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621
14	12	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645
15	DCCH	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	717	718	719
0	13	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743
1	14	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767
2	15	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791
3	16	792	793	794	795	796	797	798	799																

Como se dijo anteriormente la red celular colombiana utiliza un N=7 con grupos de 21 canales de donde se deben liberar 60 canales AMPS para introducir una primera portadora CDMA a la red celular TDMA. De estos, 42 canales son empleados para la portadora en si ($42 \times 30\text{Khz} = 1.26 \text{ MHz}$) y los 18 restantes se usan como banda de guarda. Vamos a tomar los primeros canales de la banda, pues para adición de posteriores portadoras no se necesitarán canales de guarda.

Como resultado de este proceso tenemos los canales a liberar para la ubicación de la primera portadora CDMA en la banda celular del operador B (ver tabla 10). Esta información es enviada al CCM para que los todos estos canales sean desocupados.

Tabla 10. Distribución de frecuencias de la portadora CDMA en la banda B celular.

TDMA 21 Grupos + 1ª Portadora CDMA																					
Grupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
ACCH	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354
LCR																					
DLR																					
1	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435
2	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456
3	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477
4	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498
5	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519
6	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540
7	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561
8	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582
9	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603
10	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624
11	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645
DCCH	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666
12	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737
13	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758
14	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779
15	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	

RF NORMAL IS-136

RF ESPECTRO EXPANDIDO IS-136

355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	
376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	
397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414				

1ª PORTADORA CDMA:
42 CANALES TRÁFICO
+ 18 DE GUARDA= 60
CANALES

384 Frecuencia central CDMA

3.4. TRAFICO TELEFONICO

3.4.1. Análisis del tráfico telefónico cursado por la red TDMA actual

Como paso siguiente es necesario ubicar las celdas existentes en la ciudad, esto con el objetivo de conocer las zonas con más densidad de llamadas y por lo tanto las de más tráfico telefónico. Vale la pena anotar que la red celular de la ciudad de Cali ha cambiado mucho de lo que era en sus inicios y que actualmente en lugar de planearse una red en función de cobertura se está planeando en función del tráfico telefónico.

A continuación se muestran las Estaciones base de la ciudad de Cali con sus respectivos sectores (ver tabla 11):

Tabla 11. Estaciones base y sectores de la ciudad de Cali

CELDA	SECTOR	NOMBRE	CELDA	SECTOR	NOMBRE
C001A	A	LIMONAR-A	C040A	A	SAN NICOLAS-A
C001B	B	LIMONAR-B	C040B	B	SAN NICOLAS-B
C001C	C	LIMONAR-C	C040C	C	SAN NICOLAS-C
C002A	A	BCO. OCCIDENTE-A	C041A	A	S.LIBRADA-A
C002B	B	BCO. OCCIDENTE-B	C041B	B	S.LIBRADA-B
C002C	C	BCO. OCCIDENTE-C	C041C	C	S.LIBRADA-C
C003A	A	ALAMOS-A	C042A	A	INDUSTRIAL-A
C003B	B	ALAMOS-B	C042B	B	INDUSTRIAL-B
C003C	C	ALAMOS-C	C042C	C	INDUSTRIAL-C
C004A	A	COLON-A	C043A	A	INGENIO-A
C004B	B	COLON-B	C043B	B	INGENIO-B
C004C	C	COLON-C	C043C	C	INGENIO-C
C005A	A	PANCE-A	C044A	A	ALCAZARES-A
C005B	B	PANCE-B	C044B	B	ALCAZARES-B
C005C	C	PANCE-C	C044C	C	ALCAZARES-C
C014A	A	TERMINAL-A	C045A	A	GRANADA-A
C014B	B	TERMINAL-B	C045B	B	GRANADA-B
C014C	C	TERMINAL-C	C045C	C	GRANADA-C
C015A	A	S.MONICA-A	C046A	A	VERSALLES-A
C015B	B	S.MONICA-B	C046B	B	VERSALLES-B
C015C	C	S.MONICA-C	C046C	C	VERSALLES-C
C017A	A	S. FERNANDO-A	C047A	A	DEPARTAMENTAL-A
C017B	B	S. FERNANDO-B	C047B	B	DEPARTAMENTAL-B
C017C	C	S. FERNANDO-C	C047C	C	DEPARTAMENTAL-C
C019A	A	UNICENTRO-A	C048A	A	CAPRI-A
C019B	B	UNICENTRO-B	C048B	B	CAPRI-B
C019C	C	UNICENTRO-C	C048C	C	CAPRI-C
C023A	A	STA. RITA-A	C050A	A	USACA-A
C023B	B	STA. RITA-B	C050B	B	USACA-B
C027A	A	ARANJUEZ-A	C051A	A	PLAZA CAICEDO
C027B	B	ARANJUEZ-B	C051B	B	PLAZA CAICEDO
C027C	C	ARANJUEZ-C	C051C	C	PLAZA CAICEDO
C028A	A	EL LIDO-A	C052A	A	PENON
C028B	B	EL LIDO-B	C052B	B	PEÑON
C028C	C	EL LIDO-C	C053A	A	TECNOQUIMICAS
C029A	A	AV. SEXTA-A	C053B	B	TECNOQUIMICAS
C029B	B	AV. SEXTA-B	C053C	C	TECNOQUIMICAS
C029C	C	AV. SEXTA-C	C054A	A	IMBANACO
C032A	A	EL SENA-A	C054B	B	IMBANACO
C032B	B	EL SENA-B	C061O	O	BOSQUE MUNICIPAL
C032C	C	EL SENA-C	C064A	A	REFUGIO
C033B	B	VALLE DEL LILI-O	C064B	B	REFUGIO
C033C	C	VALLE DEL LILI-O	C064C	C	REFUGIO
C034A	A	LA BASE-A	C065A	A	CIUDAD JARDIN
C034B	B	LA BASE-B	C065B	B	CIUDAD JARDIN
C034C	C	LA BASE-C	C065C	C	CIUDAD JARDIN
C039A	A	VIPASA-A			
C039B	B	VIPASA-B			
C039C	C	VIPASA-C			

Como se puede observar la mayor concentración de celdas cerca del 80% de estas se encuentran localizadas en la zona occidental de la ciudad, esto nos muestra hacia donde debemos centrar el cubrimiento de la nueva red (ver figura 36). La cercanía de las celdas nos da un indicativo de una alta congestión.



Figura 36. Estaciones base TDMA. Ciudad de Cali

Cuando se inicia la planeación de una red celular y se desconoce la distribución del tráfico telefónico, tiene que empezarse por hacer un estudio en función de la densidad de los vehículos en las calles más importantes, así como teniendo en cuenta cuales son las áreas residenciales, industriales, comerciales, etc., además debe tenerse en cuenta la hora pico y circunstancias especiales.

Para nuestro estudio no realizaremos una estimación de densidad de tráfico telefónico. Nos basaremos en las estadísticas de la compañía celular Bellsouth (Cocelco), la cual tiene adjudicada la licencia para operar en el occidente del país en la banda B. Partiremos de las estadísticas de tráfico telefónico de la ciudad de Santiago de Cali pues esta ciudad posee más de 30 celdas con más de 100000 usuarios y en algunas zonas ya se han empezado a presentar problemas de bloqueo y caída de llamadas debido a que la carga ofrecida por los usuarios es mucho mayor que el número de canales disponibles en la red.

La idea de migrar hacia una red CDMA tiene como objetivo inicial apoyar a la red existente en el manejo del tráfico de voz de los usuarios que más consumen o sea ayudando a disminuir la congestión presentada en la red actual, evitando la necesidad de que al aumentar este, se deba recurrir a instalar nuevas celdas realizando complicados estudios de planeación de frecuencias e interferencias.

A continuación se muestra un análisis de la intensidad de tráfico telefónico cursado en la ciudad de Cali en cada una de sus celdas y sus respectivos sectores (ver tabla 12).

Es necesario identificar las celdas con más tráfico telefónico para que sean prioridad en la escogencia de la cobertura de las celdas CDMA. Es decir, en los lugares donde exista mayor congestión las celdas CDMA deberán tener menor cobertura para garantizar el grado de servicio deseado.

3.4.2. Análisis del tráfico telefónico para la red CDMA

Teniendo en cuenta la cantidad de llamadas cursadas por las Estaciones base actuales se comienza a buscar una distribución de las nuevas estaciones base que puedan cubrir toda la ciudad, pues el usuario CDMA debe tener la facilidad de movilizarse por toda esta sin ningún inconveniente. Cada nueva celda CDMA va a asumir una parte del tráfico telefónico del grupo de celdas TDMA a las que se sobreponga.

En un mapa de la zona de interés se sobrepone un esquema en forma de celdas (ver figura 37), es decir, hexágonos cuya cantidad es igual al número de estaciones base con que inicialmente va a contar la nueva red CDMA de acuerdo a la densidad de tráfico telefónico.

Tabla 12. Tráfico telefónico actual cursado por las Estaciones base de la ciudad de Cali

CELDA	NOMBRE	DIG	ANLG	TOT	CELDA	NOMBRE	DIG	ANLG	TOT
C001A	LIMONAR-A	30,57	0,23	30,8	C039A	VIPASA-A	21,33	0,4	21,73
C001B	LIMONAR-B	37,63	0,63	38,27	C039B	VIPASA-B	19,5	0,2	19,7
C001C	LIMONAR-C	37,47	0	37,47	C039C	VIPASA-C	33,13	0	33,13
C002A	B.OCCIDENTE-A	19,63	0,8	20,43	C040A	SAN NICOLAS-A	29,47	0,87	30,33
C002B	B.OCCIDENTE-B	24,97	1,4	26,37	C040B	SAN NICOLAS-B	13,23	0,5	13,73
C002C	B.OCCIDENTE-C	21,57	1,2	22,77	C040C	SN NICOLAS-C	29,1	0,6	29,7
C003A	ALAMOS-A	32,8	0	32,8	C041A	STA LIBRADA-A	16,6	0,67	17,27
C003B	ALAMOS-B	11,93	0,57	12,5	C041B	STA LIBRADA-B	17,3	0,7	18
C003C	ALAMOS-C	33,43	0	33,43	C041C	STA LIBRADA-C	10,47	0,1	10,57
C004A	COLON-A	10,9	0,37	11,27	C042A	INDUSTRIAL-A	10,87	0,43	11,3
C004B	COLON-B	31,9	1,47	33,37	C042B	INDUSTRIAL-B	10,17	0,5	10,67
C004C	COLON-C	15,63	0,17	15,8	C042C	INDUSTRIAL-C	11,7	0,23	11,93
C014A	TERMINAL -A	23,6	1,03	24,63	C043A	INGENIO-A	20,97	2,5	23,47
C014B	TERMINAL -B	15,43	1,43	16,87	C043B	INGENIO-B	13,2	1,2	14,4
C014C	TERMINAL -C	39,43	3	42,43	C043C	INGENIO-C	13,8	0,73	14,53
C015A	STA.MONICA P.-A	8,4	0,13	8,53	C044A	ALCAZARES-A	11,57	0,63	12,2
C015B	STA.MONICA P.-B	17,5	4,57	22,07	C044B	ALCAZARES-B	17,03	0,63	17,67
C015C	STA.MONICA P.-C	11,6	0,8	12,4	C044C	ALCAZARES-C	15,73	0,57	16,3
C017A	S. FERNANDO-A	8,2	0,13	8,33	C045A	GRANADA-A	14,4	0,73	15,13
C017B	S. FERNANDO-B	32,3	0,6	32,9	C045B	GRANADA-B	15,2	0,5	15,7
C017C	S. FERNANDO-C	27,5	0,4	27,9	C045C	GRANADA-C	12,67	0,07	12,73
C019A	UNICENTRO -A	27	2,83	29,83	C046A	VERSALLES-A	13,83	1,2	15,03
C019B	UNICENTRO -B	39,03	3,37	42,4	C046B	VERSALLES-B	23,13	0,9	24,03
C019C	UNICENTRO -C	13,6	3,33	16,93	C046C	VERSALLES-C	16,8	0,93	17,73
C023A	SANTA RITA-A	17,03	0,27	17,3	C047A	DEPTAL-A	17,23	0,53	17,77
C023B	SANTA RITA-B	21,83	0,73	22,57	C047B	DEPTAL-B	22,5	0,77	23,27
C027A	ARANJUAES-A	11,8	0,77	12,57	C047C	DEPTAL-C	20,47	0,37	20,83
C027B	ARANJUAES-B	16,1	2,77	18,87	C048A	CAPRI-A	18,8	0,6	19,4
C027C	ARANJUAES-C	16,63	1,37	18	C048B	CAPRI-B	23,6	0,73	24,33
C028A	EL LIDO-A	31,87	0	31,87	C048C	CAPRI-C	11,7	0,5	12,2
C028B	EL LIDO-B	18,47	0,27	18,73	C050A	Usaca A	20	1,8	21,8
C028C	EL LIDO-C	10,6	0,27	10,87	C050B	Usaca B	25,07	1,97	27,03
C029A	AVN SEXTA-A	13,13	1,03	14,17	C051A	Plaza Caicedo A	16,97	0,47	17,43
C029B	AVN SEXTA-B	33,93	3,3	37,23	C051B	Plaza Caicedo B	21,57	0,9	22,47
C029C	AVN SEXTA-C	19,83	0,93	20,77	C051C	Plaza Caicedo C	25,83	0,83	26,67
C032A	SENA-A	18,67	0,67	19,33	C052A	Peñon A	19,17	0,63	19,8
C032B	SENA-B	15,67	0,87	16,53	C052B	Peñon B	11,8	0,03	11,83
C032C	SENA-C	17,4	0,5	17,9	C053A	Tecnoquimicas A	8,67	0,33	9
C033A	VALLE DE LILI-A	37,97	0,63	38,6	C053B	Tecnoquimicas B	8,7	0,33	9,03
C034A	LA BASE-A	10,87	0,27	11,13	C053C	Tecnoquimicas C	14,77	1,17	15,93
C034B	LA BASE-B	9,07	0,5	9,57	C054A	Imbanaco A	13,63	0	13,63
C034C	LA BASE-C	9,4	0,53	9,93	C054B	Imbanaco B	16,83	0	16,83
					C061O	Bque Municipal	8,33	0,27	8,6

Aunque teóricamente las celdas CDMA tengan radios máximos de hasta 9 Km, tenemos que prever una distribución de celdas que las permita crecer en el número de abonados que manejan durante los próximos años haciendo la red adaptable a las condiciones que se vayan presentando con el tiempo.

Los tamaños de los hexágonos equivalen a las coberturas deseadas de las celdas, y aunque son teóricas, representan el punto de partida para luego definir el cubrimiento y la ubicación real de las estaciones base.



Figura 37. Mapa futuras zonas CDMA. Ciudad de Cali.

En la mayoría de los casos las zonas con diferentes concentraciones de tráfico telefónico están tan próximas unas de otras que la expansión del sistema no puede realizarse hasta que se haya empezado la aproximación a la nueva distribución, disminuyendo progresivamente el tamaño de las celdas. Por ello, en la práctica, una red no está compuesta por celdas homogéneas sino por un grupo de celdas de diferentes tamaños con cobertura en todas las direcciones.

Debe tenerse siempre en cuenta que los valores calculados para la futura distribución de tráfico telefónico son solo estimaciones aproximadas del tráfico telefónico real que se desviará del valor calculado. En consecuencia, la planeación de la red debe ser lo suficientemente flexible para permitir su reestructuración de manera que se adapte a las necesidades reales.

Existen dos tipos de tráfico telefónico: Uniforme y no uniforme.

Una distribución de tráfico telefónico uniforme puede ser conveniente como aproximación para el inicio de sistemas con celdas de áreas de cobertura extensas. Este tipo de celdas se utiliza especialmente en zonas rurales.

La distribución de tráfico telefónico no uniforme es el caso más usual, especialmente para las zonas urbanas. El pico de tráfico se da normalmente en el centro de la ciudad con picos locales en centros suburbanos y conexiones con las principales carreteras. Este será el tipo de distribución que tendremos en cuenta en este proyecto. También se da el caso de zonas con alta concentración y disminución progresiva del tráfico telefónico a medida que nos alejamos de las zonas urbanas (ver figura 38).

Zona 1:

Esta zona maneja un tráfico telefónico mediano, comprende el sur de la ciudad de Cali, en ella se encuentran varias Universidades, centros comerciales, clubes sociales, clínicas, así como barrios de estrato alto que presentan gran consumo del servicio celular entre ellos Ciudad Jardín. Esta zona estaría delimitada por la Carrera 122 hasta la carrera 70 y la calle 2 Oeste hasta la calle 50.

Zona 2:

Designaremos esta zona como de alto tráfico telefónico, pues en ella se encuentran varios escenarios deportivos, de espectáculos, Universidades y centros comerciales, así como zonas residenciales de estratos medios y altos. Esta zona estaría delimitada por la Carrera 70 hasta la carrera 23 y la calle 2 Oeste hasta la calle 27.

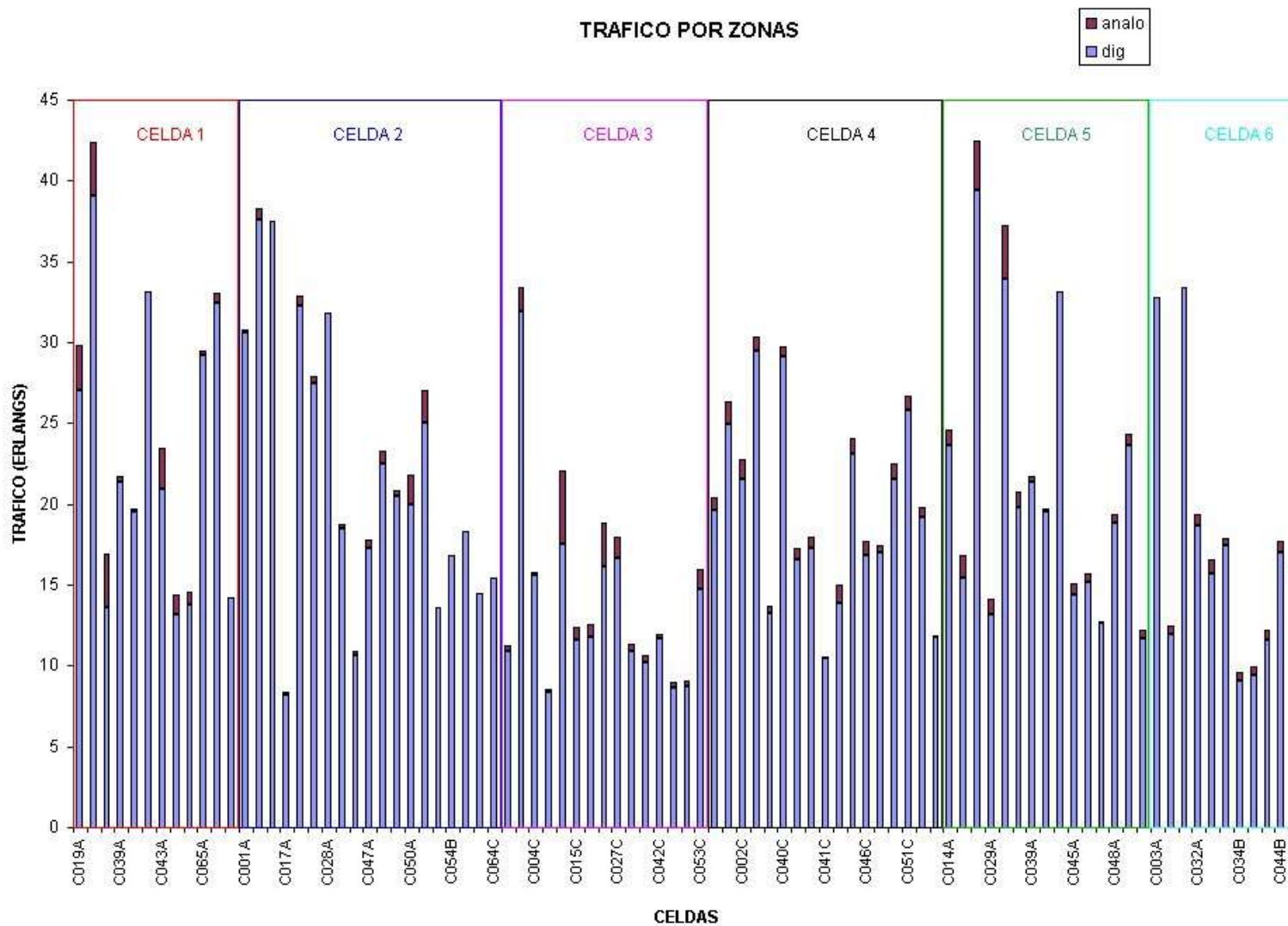


Figura 38. Gráfica de tráfico actual por futuras zonas CDMA

Zona 3:

Esta zona se clasifica como de bajo tráfico telefónico, es la zona centro oriental, aunque incluye zonas Industriales también incluye barrios de estrato medio y bajo en su mayoría es de carácter residencial. Esta zona estaría delimitada por la Carrera 45 hasta la carrera 8 y la calle 10 hasta la calle 70.

Zona 4:

Esta zona se clasifica como de alto tráfico telefónico, corresponde a la zona centro de la ciudad, posee una alta densidad de usuarios, incluye la administración municipal, hoteles importantes, museos, sitios culturales, alto comercio, entre otros sitios. Se caracteriza por ser una zona que se puede clasificar como urbana. Esta zona estaría delimitada por la Carrera 23 hasta la carrera 2 y la calle 4 Oeste hasta la calle 22.

Zona 5:

Esta zona se puede clasificar como de alto tráfico telefónico, corresponde a la zona nor-occidental de la ciudad, incluye la zona rosa de la ciudad (Avenida 6), terminal de transportes, centros comerciales, hospitales, así como zonas residenciales de estratos medios y altos. Esta zona estaría delimitada por la Carrera 2 hasta la calle 64 N y la Avenida 9 hasta la calle 44.

Zona 6:

Designaremos esta zona como de bajo tráfico telefónico, comprende el nor-oriental de la ciudad en ella se incluyen la base aérea, algunos centros recreativos y zonas residenciales de estrato medio y bajo. Esta zona estaría delimitada por la Carrera 11 hasta la carrera 38 Norte y la calle 35 hasta la calle 86.

Como el proceso que se está realizando es el de migración, el paso de una red a otra debe hacerse por etapas, así que la nueva red va a soportar el 10% del tráfico telefónico total manejado por las celdas existentes en cada una de las zonas designadas. La tabla 13 muestra la cantidad total de tráfico telefónico existente por zonas CDMA que abarcan celdas TDMA.

En nuestro diseño según la demostración del capítulo 1, se utilizarán equipos CDMA2000 1x los cuales tienen una capacidad máxima actual por sector o celda de 35 usuarios por portadora. El grado de servicio con que dimensionaremos la red es del 5%, el cual es el valor exigido por el Ministerio de Comunicaciones a cada una de las compañías operadoras del servicio de Telefonía móvil celular. Este grado de servicio corresponde al porcentaje de llamadas que se bloquean, es decir, no logran ser exitosas. Dicho bloqueo puede suceder en una red celular por cualquiera de los siguientes factores:

- No hay suficientes canales de voz.
- No hay suficientes troncales entre la Estación base y el centro de conmutación móvil.
- No hay suficientes troncales desde el centro de conmutación móvil y la red pública conmutada.
- No hay suficientes circuitos a nivel interno del centro de conmutación móvil.

Tabla 13. Tráfico telefónico total por zonas

TOTAL TRAFICO POR ZONAS		
ZONAS O GRUPOS DE CELDAS	Total por zona (Erlangs)	10% del total (Erlangs)
1	292,86	29,286
2	426,54	42,654
3	220,74	22,074
4	344,16	33,416
5	330,15	33,015
6	198,16	19,816

Con la intensidad de tráfico telefónico hallada en Erlangs, de cada una de las futuras estaciones base y aplicando la formula de Erlang B que se usa en sistemas celulares por ser sistemas con pérdida (Ver anexo Ingeniería de tráfico), teniendo el valor del grado de servicio deseado, podemos hallar el número de canales de voz que se necesitan en cada una de las estaciones base.

3.4.3. Cálculo del número de canales de voz CDMA

Usando la herramienta desarrollada, se hace el calculo de los canales de voz necesarios en cada celda así como el cálculo de cuales celdas deben ser sectorizadas y cuales no.

El número de canales de voz por celda CDMA o sector (si esta es sectorizada) tanto para el enlace delantero como de reversa se tomará de 35, ya que actualmente se está obteniendo una capacidad por portadora de entre 32 y 38 usuarios digitales de voz con sus respectivos canales de paging, piloto y sincronización.

Zona 1:

Tráfico telefónico: 29.286 Erlangs.

Al hacer el cálculo correspondiente, el número de canales de voz que resultan para cubrir esta zona es de 35 presentando un grado de servicio del 4.56%. Por tal motivo no se necesita sectorización.

Zona 2:

Tráfico telefónico: 42.654 Erlangs.

Al hacer el cálculo correspondiente, el número de canales de voz que resultan para cubrir esta zona es de 49 presentando un grado de servicio del 4.25%, el número de canales supera los 35. Comercialmente no se tiene solución para este requerimiento, por lo tanto esta celda contará con 3 sectores de 120 grados cada uno, para distribuir mejor los canales de voz en toda la celda.

Zona 3:

Tráfico telefónico: 22.074 Erlangs.

Al realizar el cálculo correspondiente, el número de canales de voz necesarios para cubrir esta zona es de 28 obteniéndose un grado de servicio del 3.97%. Por esta razón, esta zona se podrá cubrir con un solo sector.

Zona 4:

Tráfico telefónico: 33.416 Erlangs.

Usando la herramienta de cálculo, se obtiene que con este tráfico telefónico el número de canales de voz que resultan para cubrir esta zona es de 39 presentando un grado de servicio del 4.79%. Teniendo en cuenta que esta zona abarca el centro de la ciudad así como su parte administrativa y de negocios, es necesario realizar una división en tres sectores de 120° cada uno.

Zona 5:

Tráfico telefónico: 33.015 Erlangs.

Al hacer el cálculo correspondiente, el número de canales de voz que resultan para cubrir esta zona es de 39 presentando un grado de servicio del 4.39%. Cabe destacar que es en este sector donde se encuentra la zona rosa de la ciudad. Por lo tanto se necesita sectorizar esta zona y se hará en divisiones de 120° cada una.

Zona 6:

Tráfico telefónico: 19.816 Erlangs.

Al utilizar la herramienta de cálculo se obtiene que el número de canales de voz que resultan para cubrir esta zona es de 25 presentando un grado de servicio del 4.75%. Por tal motivo no se necesita sectorización.

Aunque una de las ventajas de la tecnología CDMA es que sus códigos evitan interferencias, es necesario establecer un patrón de orientación para los sectores de las celdas. Es decir, todos los sectores X deberán tener el mismo azimut lo mismo que los sectores Y y Z.

Para este diseño, todos los sectores X tienen un azimut de 0°, los sectores Y un azimut de 120° y los sectores Z un azimut de 240°.

4. PROPAGACIÓN Y COBERTURA

En este capítulo se realizará el estudio de propagación y cobertura para la red celular CDMA de la ciudad de Cali, teniendo en cuenta los factores críticos que afectan la calidad de los enlaces en las diferentes zonas de prestación del servicio y que tendrá como resultado, la determinación de los límites de cobertura promedio de la red propuesta.

4.1. INTRODUCCIÓN

Antes de implementar una celda, un cluster de celdas o un sistema, necesitamos saber si el diseño de la celda, del cluster o del sistema CDMA soportará o no los enlaces básicos de radio. En otras palabras, necesitamos saber si todos los parámetros de radio son adecuados para mantener una alta calidad del enlace de radio entre la estación base y el móvil.

En cualquier sistema de comunicaciones estamos interesados en un parámetro crítico, C/N , el cual es la relación portadora-ruido en el receptor. Este parámetro define cuanta potencia de señal hay comparada con la potencia de ruido en un canal; por consiguiente, C/N puede ser considerada como la figura de mérito para los sistemas de comunicaciones.

La ecuación del enlace es una ecuación que calcula la C/N usando algunos otros parámetros del sistema de comunicaciones:

$$\frac{C}{N} = \frac{(ERP)L_p G_r}{N} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde ERP es la potencia efectiva radiada por la antena transmisora, L_p son las pérdidas de propagación en el canal, G_r es la ganancia de la antena receptora, y N es la potencia efectiva de ruido. Particularmente, la ERP se calcula con la siguiente ecuación:

$$ERP = P_t L_c G_t \quad \text{Ec. 4.2}$$

Donde P_t es la salida del amplificador de potencia en el transmisor, L_c son las pérdidas del cable entre el amplificador de potencia y la antena transmisora, y G_t es la ganancia de la antena

transmisora. Aunque existen muchas definiciones sobre la potencia efectiva de ruido, N , aquí vamos a restringir esta definición solamente al ruido térmico, la cual se define como:

$$N = kTW \quad \text{Ec. 4.3}$$

Donde k es la constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ W/Hz/K o $-228,6$ dBW/Hz/K), T es la temperatura de ruido del receptor, y W es el ancho de banda del sistema. Otro parámetro importante que se encuentra en el estudio de un sistema de comunicaciones es la C/I , o relación portadora - interferencia. C/I difiere de C/N en que el denominador de C/I incluye no solamente el ruido térmico sino también la potencia de interferencia de otras fuentes. En sistemas de comunicaciones móviles, C/I es una figura de mérito mucho más usada por que tiene en cuenta otros efectos de interferencia. Por ahora, vamos a usar la relación portadora – ruido como indicador de la calidad del enlace. Como se puede ver en la ecuación 4.1, la calidad del enlace depende de parámetros tales como las ganancias de las antenas transmisora y receptora, potencia de transmisión, y temperatura de ruido del receptor. Todos estos parámetros están dentro del control del diseñador del sistema y pueden ser cambiados para optimizar su desempeño. Sin embargo, existe un parámetro en (4.1) que no está dentro del control del diseñador del sistema y es el correspondiente a las pérdidas de propagación, o pérdidas de trayecto. Estas pérdidas se refieren a las pérdidas que sufre la señal en el camino desde el transmisor hasta el receptor. A continuación se discutirán algunos métodos de predicción de pérdidas de propagación.

4.2. PERDIDAS DE PROPAGACIÓN

Los canales de radio móvil son una de las limitaciones fundamentales en el desempeño de los sistemas de comunicación inalámbricos. La trayectoria de transmisión entre el transmisor y el receptor puede variar desde tener línea de vista hasta estar severamente obstruida por edificios, montañas y follaje. A diferencia de los canales alambrados que son estacionarios y predecibles, los canales de radio son extremadamente aleatorios y no ofrecen un análisis sencillo. El modelado de los canales de radio ha sido siempre una de las partes más difíciles en el diseño de los sistemas de radio móvil, y es típicamente hecho sobre bases estadísticas.

Los mecanismos detrás de la propagación de las ondas electromagnéticas son diversos, pero generalmente pueden ser atribuidos a: reflexión, difracción y dispersión. La mayoría de los sistemas de radio celular operan en áreas urbanas donde no hay línea de vista directa entre el transmisor y el receptor, y donde la presencia de edificios demasiado altos provoca severas pérdidas por difracción.

Debido a las múltiples reflexiones en varios objetos, las ondas electromagnéticas viajan por diferentes rutas de diferentes longitudes. La interacción entre estas ondas causa desvanecimiento por multitrayecto en una ubicación específica y la potencia de la señal disminuye conforme se incrementa la distancia entre el transmisor y receptor.

Los modelos de propagación se han enfocado tradicionalmente en predecir la potencia promedio de la señal recibida, así como la variación de la potencia en la proximidad espacial de un lugar en particular. Los modelos de propagación que predicen la potencia media de señal para una distancia de separación arbitraria entre el transmisor y receptor son útiles para estimar el área de cobertura de un transmisor y son llamados modelos de gran escala de propagación (*large-scale propagation models*), usados para distancias grandes entre transmisor y receptor (de cientos o miles de kilómetros). Por otra parte los modelos de propagación que caracterizan las rápidas fluctuaciones de potencia de la señal recibida sobre distancias muy cortas (pocas longitudes de onda) o tiempos de duración cortos (del orden de segundos) son llamados: modelos de pequeña escala (*small-scale* o *fading models*).

4.3. MODELOS DE PROPAGACIÓN

4.3.1. Propagación en el Espacio Libre

Este modelo es utilizado para predecir la potencia de la señal cuando entre el transmisor y el receptor existe una clara línea de vista. Así como la mayoría de los modelos de propagación large-scale, el modelo del espacio libre predice que la potencia recibida decae como función de la distancia de separación entre el transmisor y receptor elevada a alguna potencia. La potencia recibida en el espacio libre por una antena receptora la cual está separada de la antena transmisora una distancia d , está dada por la ecuación de Fritz:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad \text{Ec. 4.4}$$

Donde P_t es la potencia transmitida, P_r es la potencia recibida la cual es función de la separación T-R (transmisor-receptor), G_t es la ganancia de antena transmisora, G_r es la ganancia de la antena receptora, d es la distancia de separación de T-R dada en metros, L es el factor de pérdida del sistema no relacionado a la propagación, y λ es la longitud de onda dada en metros. La ecuación de Fritz muestra que la potencia de la señal recibida se atenúa conforme el cuadrado de la distancia entre el transmisor y el receptor, lo que implica que decae 20 dB/década, esto significa que la potencia recibida disminuye 6 db cada vez que se dobla la distancia.

4.3.2. Difracción en Cuchilla (Knife-edge Diffraction Model)

Estimar la atenuación causada por la difracción de las ondas de radio sobre montes y construcciones es esencial para predecir la potencia del campo en una área de servicio determinada. En general es imposible hacer estimaciones muy precisas sobre las pérdidas por difracción; en la práctica la predicción se hace por medio de aproximaciones teóricas, con ciertas correcciones empíricas. A pesar de los cálculos de las pérdidas por difracción sobre zonas irregulares resulta una dificultad matemática, se han derivado expresiones para muchos casos simples. Como punto de partida, el caso (limitado) de la propagación sobre una cuchilla nos da una respuesta a la magnitud de las pérdidas por difracción.

Cuando existe una sombra causada por un único objeto como una montaña, se puede estimar la atenuación, causada por la difracción, considerando a la obstrucción como una cuchilla difractante. Este es el más simple de los modelos de difracción; las pérdidas por difracción se pueden calcular usando la solución típica de Fresnel para campos detrás de una cuchilla.

Considere un receptor en el punto R, localizado en la región de sombra (también conocida como zona de difracción). La potencia del campo en el punto R es una sumatoria de vectores de los campos debidos a todas las fuentes secundarias de Huygen en el plano sobre la cuchilla. La ganancia de difracción debida a la presencia de la cuchilla se compara con el campo eléctrico en el espacio libre dado por:

$$G_v(dB) = 20\text{LOG}|F(v)| \quad \text{Ec. 4.5}$$

El fenómeno de difracción decrece con el incremento de la frecuencia, pero para las frecuencias de la banda celular (800-900 MHz) no son significativas y podemos tener la señal alrededor de un pico de difracción.

4.4. OTRAS CONSIDERACIONES

La lluvia, absorción, vapor de agua y oxígeno también son causa de atenuación de la señal pero tienen una importancia significativa a frecuencias muy altas por lo tanto en los sistemas que operan en la banda celular son descartados.

4.5. MODELOS DE PROPAGACIÓN EN EXTERIORES

Generalmente los sistemas de telefonía celular son instalados en zonas o sectores de superficies irregulares. Dicha característica debe ser tomada en cuenta para poder estimar las pérdidas por la propagación. Los modelos de propagación en exteriores son una herramienta muy útil para estas situaciones, los cuales consideran parámetros como el perfil del terreno, que puede variar en diferentes características (por ejemplo montañoso o muy inclinado) así como los demás elementos que también deben ser tomados en cuenta, tales como la presencia de árboles, edificios y otros obstáculos.

Los métodos varían ampliamente en su complejidad y aproximación ya que la mayoría son basados en una interpretación sistemática de mediciones de datos obtenidos del área de servicio.

A continuación se listan algunos de estos modelos:

4.5.1. Modelo de Okumura

El modelo de Okumura es uno de los más ampliamente utilizados para predicción de señales en áreas urbanas. Este modelo es aplicable para frecuencias en el rango de 150 MHz a los 1920 MHz (sin embargo típicamente es extrapolado para frecuencias arriba de 3000 MHz) y distancias de 1 Km a 100 Km. Puede ser usado para alturas de la antena de la estación base en el rango de 30 m a 1000 m.

Okumura desarrollo un grupo de curvas que brindan el valor de la atenuación media relativa al espacio libre, además de basarse en parámetros pre-definidos. Los valores obtenidos de cada curva fueron obtenidos por exhaustivas mediciones usando antenas verticales y omni-direccionales tanto en la base como en el móvil y graficadas en función de la frecuencia en el rango de los 100 MHz a los 1920 MHz y como una función de la distancia. El modelo puede ser expresado como:

$$L_{50}(dB) = L_r + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA} \quad \text{Ec. 4.6}$$

Donde:

L_{50} = Pérdidas por propagación en espacio libre (el subíndice 50 hace referencia al valor medio).

$G(h_{te})$ = Es el factor de la ganancia de la altura de la antena de la Estación Base.

$G(h_{re})$ = Es el factor de la ganancia de la altura de la antena del móvil.

G_{AREA} = Es la ganancia debido al tipo de ambiente.

$A_{mu}(f, d)$ = Atenuación relativa promedio (Curvas)

L_r = Pérdidas en el receptor

Okumura encontró que $G(h_{te})$ varía a un índice de 20 dB/decada y $G(h_{re})$ varía a un índice de 10 dB/decada para alturas menores que 3 m.

$$G(h_{te}) = 20\log(h_{te}/200) \quad 1000 \text{ m} > h_{te} > 30 \text{ m}$$

$$G(h_{re}) = 10\log(h_{re}/3) \quad h_{re} < 3 \text{ m}$$

$$G(h_{re}) = 20\log(h_{re}/3) \quad 10 \text{ m} > h_{re} > 3 \text{ m}$$

El modelo de Okumura está totalmente basado en mediciones de datos y no provee de una explicación analítica. Su versatilidad lo ha vuelto un estándar para la planeación de sistemas de comunicación celular modernos en Japón. La más grande desventaja de este, es su lenta respuesta a los cambios rápidos en el terreno.

4.5.2. Modelo de Hata

Este modelo es una formulación empírica de los datos de las pérdidas de propagación provistos por Okumura, y es válido de los 150 MHz a los 1500 MHz. Hata presentó las pérdidas dentro de un área urbana como una fórmula estándar:

$$L_{50}(\text{urbano})(\text{dB}) = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log h_{te}) \log(d) \quad \text{Ec.4.7}$$

Tomando en cuenta que:

$$150 \text{ MHz} < f_c < 1500 \text{ MHz}$$

$$30 \text{ m} < h_{te} < 200 \text{ m}$$

$$1 \text{ m} < h_{re} < 10 \text{ m}$$

Involucra una nueva variable que es el factor de corrección de la antena del móvil y se define según el tamaño de la ciudad:

Para ciudades pequeñas y medianas:

$$a(h_{re}) = (1.1 \log f_c - 0.7)h_{re} - (1.56 \log f_c - 0.8) \text{ dB} \quad \text{Ec. 4.8a}$$

Para ciudades grandes:

$$a(h_{re}) = 8.29(\log 1.54h_{re})^2 - 1.1 \text{ dB para } f_c < 300 \text{ MHz} \quad \text{Ec. 4.8b}$$

$$a(h_{re}) = 3.2(\log 11.75h_{re})^2 - 4.97 \text{ dB para } f_c > 300 \text{ MHz} \quad \text{Ec. 4.8c}$$

Para utilizar la misma fórmula en un ambiente suburbano se utiliza como:

$$L_{50}(\text{dB}) = L_{50}(\text{urbano}) - 2[\log(f_c/28)]^2 - 5.4 \quad \text{Ec. 4.9}$$

Para áreas rurales:

$$L_{50}(\text{dB}) = L_{50}(\text{urbano}) - 4.78(\log f_c)^2 + 18.33\log f_c - 40.94 \quad \text{Ec. 4.10}$$

Este modelo se adapta muy bien para el diseño de sistemas de gran escala, pero no para sistemas PCS los cuales tienen celdas del orden de 1 Km de radio.

4.5.3. Modelo de Walfish y Bertoni

Este modelo considera el impacto de las azoteas y alturas de los edificios considerando la refracción para predecir la fuerza de la señal al nivel de las calles y es válido para el rango de frecuencias entre los 800MHz y los 2000MHz. El modelo considera tres parámetros para medir las pérdidas de propagación(S):

$$S = P_0 Q^2 P_1$$

Donde,

$$P_0 = (1/4R)^2$$

Q^2 = se refiere a la reducción en la señal a nivel de la azotea debida a las columnas de los edificios.

P_1 = termino que especifica las pérdidas por difracción de la señal que viaja desde las azoteas de los edificios hasta las calles

R = Distancia entre la antena transmisora y la primera obstrucción antes del móvil.

En dB, las pérdidas totales se expresan como:

$$S(\text{dB}) = L_0 + L_{rts} + L_{ms} \quad \text{Ec. 4.11}$$

Donde,

L_0 = Pérdidas de espacio libre

L_{rts} = Pérdidas de difracción techo – calle

L_{ms} = Pérdidas multipantalla

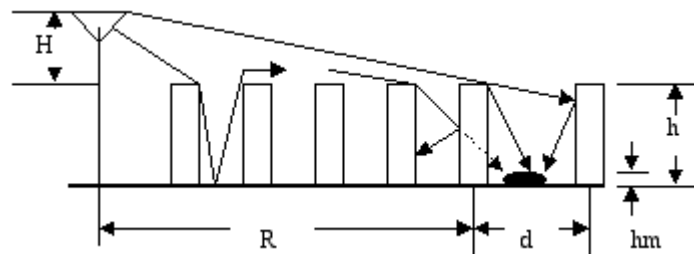


Figura 39. Modelo Walfish y Bertoni

4.5.4. Modelo de Lee

$$L_p = 1.14 \times 10^{-13} \frac{h^2}{d^{3.84}} \quad \text{Ec. 4.12}$$

La anterior ecuación representa la versión simplificada para las frecuencias de banda celular del modelo de propagación de Lee, donde d la distancia (en kilómetros) entre la estación base y el usuario móvil y h es la altura (en metros) de la antena de la estación base. Se puede notar que, las pérdidas de trayecto se dan como un inverso de la potencia en un factor de 3.84 comparado con la potencia inversa de un factor de 2 en el modelo de espacio libre.

Convirtiendo (4.12) en decibeles:

$$L_f = -129.45 - 38.4 \log(d) + 20 \log(h) \quad \text{Ec. 4.13}$$

Donde, otra vez, d está en kilómetros y h está en metros. Podemos notar que en (4.13) la caída en las pérdidas de propagación es -38.4 dB/decada. La forma generalizada del modelo de Lee es mucho más compleja que la que se presenta en (4.12) y (4.13). El modelo es bastante poderoso y contiene diferentes parámetros para usar bajo diferentes condiciones de propagación y terrestres. Pero para estudios en la banda celular es muy útil y sencillo.

Debido a su sencillez y precisión se escogió el modelo de Lee para determinar el tamaño de las celdas CDMA.

4.6. COBERTURA

Una de la reglas más importantes a seguir en el diseño de un sistema de telefonía celular es asegurar que el límite del área de servicio (*service area boundary SAB*) de un sistema móvil no sobrepase el Area servicio geográfico celular (*cellular geographic service area*) CGSA de un operador, asignado como parte de la licencia de operación. El CGSA de un operador celular es el área a cubrir por el sistema móvil del operador. El CGSA también es el área dentro del cual el operador está obligado a protegerse de efectos adversos, uno de los cuales debe ser la interferencia de operadores vecinos operando en el mismo bloque de frecuencia. Aquí se va a tratar la determinación del SAB de un sistema celular CDMA. Debido a que CDMA es una tecnología diferente de AMPS, el método de intensidad de campo para la determinación del límite de servicio no se traslada directamente dentro de un esquema de modulación digital cuyo contenido de información está ensanchado en banda.

4.6.1. Determinación del SAB CDMA con sectores múltiples

Como su contraparte AMPS, el sistema CDMA como se especifica en IS-95 no usa el mismo esquema de modulación sobre ambos enlaces delantero y de reversa. De los cuatro tipos de canales del enlace hacia delante, el canal piloto y su señal determina efectivamente el área de cobertura hacia delante de una estación base.

A pesar de que la señal piloto determina el área de cobertura hacia delante, esta no es la única que define el área de servicio efectivo de una estación base. Además para la demodulación satisfactoria de la señal piloto, el móvil debe transmitir la suficiente potencia para cerrar el canal de tráfico de reversa. En algunas situaciones, el sistema CDMA está limitado en el enlace de reversa. Por lo tanto, una buena definición del SAB para un sistema CDMA debería tener en cuenta ambos canales, el canal piloto delantero y el canal de tráfico de reversa. Se define d_f , o distancia de servicio hacia delante, la distancia entre una estación base y un móvil tal que la intensidad del piloto recibida es mayor a un umbral predeterminado, y d_r , o distancia de servicio hacia atrás, la distancia radial tal que la intensidad de la señal de tráfico recibida es mayor a un umbral predeterminado.

La intensidad del piloto hacia delante está definida en términos de la relación de la energía de chip del piloto a la densidad espectral de potencia total recibida (E_c/I_o); esta cantidad para un móvil de prueba es

$$\frac{E_c}{I_o} = \frac{\alpha_o P_o(\theta_o) L_o(\theta_o, d_o) G}{I_h + I_n + I_o + N} \quad \text{Ec. 4.14}$$

donde:

- $P_o(\theta_o)$ = ERP de la estación base anfitriona (sector 0) incluyendo las potencias del piloto, paging y sincronización en la dirección θ_o al móvil de prueba. Note que en general, debido a que el ERP depende del patrón de antena (el cual es una función de la dirección θ_o), el ERP es en sí mismo también una función de la dirección θ_o .
- α_o = parte del ERP de la estación base anfitriona asignada a la potencia del piloto.
- $L_o(\theta_o, d_o)$ = pérdida de trayecto de la estación base anfitriona en la dirección θ_o al móvil de prueba a una distancia d_o .
- G = ganancia de antena receptora del móvil de prueba.
- I_h = potencia recibida en el móvil de prueba de toda la potencia emitida por la estación base anfitriona.

- I_n = potencia recibida en el móvil de prueba de otras fuentes de interferencia no originada por el sistema CDMA. Este término es incluido para acomodar todas las otras posibles fuentes de interferencia que podrían estar presentes en el sistema en la banda CDMA.
- I_o = potencia recibida en el móvil de prueba de otras potencias emitidas por otras estaciones base.
- N = potencia de ruido térmico.

La ecuación 4.14 se obtiene de las deducciones mostradas en el anexo D.

Se puede definir un umbral E_c/I_o para una estación base en particular (o un sector de una estación base) de tal forma que un móvil no consideraría por más tiempo que ese sector es un servidor activo. La simulación y medidas de campo muestran que, en promedio, un umbral de E_c/I_o de -12 dB proporciona un balance suficiente del enlace hacia delante y hacia atrás y el cumplimiento del soft handoff cuando un móvil pasa de una celda a la siguiente. Debido a que las señales del canal de tráfico ensanchado son transmitidas en la misma banda, las potencias de tráfico contribuyen al factor de interferencia en el denominador. Entre más móviles haya en la vecindad, más interferencia de canal de tráfico está presente en el denominador, y el móvil de prueba en particular recibe un pequeño E_c/I_o . Por lo tanto, con un umbral de E_c/I_o dado, el área de servicio efectivo hacia delante de una celda, se expande y se contrae dependiendo de la carga de tráfico. Este fenómeno es llamado *cell breathing*. La extensión del *cell breathing* de una estación base en particular varía a lo largo del día y depende del patrón de tráfico en el área. El caso de descarga caracterizado por la ecuación (4.14) se usa con el objetivo de determinar el SAB; este caso proporciona una estimación considerable del SAB hacia delante desde la perspectiva de interferencia. Tenemos que:

$$I_h = P_o(\theta_o)L_o(\theta_o, d_o)G \quad \text{Ec. 4.15}$$

Sin embargo, el factor de interferencia I_o también incluye términos introducidos de otras celdas o sectores en la vecindad:

$$I_o = G \sum P_k(\theta_k)L_k(\theta_k, d_k) \quad \text{Ec. 4.16}$$

donde $L_k(\theta_k, d_k)$ es la pérdida de trayecto de la celda vecina k -ésima (o sector) al móvil de prueba; el valor de K es el número de celdas vecinas o sectores, los cuales transmiten la suficiente potencia para contribuir con la interferencia percibida por el móvil de prueba, y la sumatoria es de la interferencia de todo este grupo de celdas o sectores.

Resolviendo (4.14) para $L_o(\theta_o, d_o)$, se tiene:

$$L_o(\theta_o, d_o) = \frac{\frac{E_c}{I_o} \left(G \sum_{k=1}^K P_k(\theta_k) L_k(\theta_k, d_k) + I_n + N \right)}{\alpha_o P_o(\theta_o) \left(1 - \frac{E_c}{I_o \alpha_o} \right) G} \quad \text{Ec. 4.17}$$

Similantemente, la energía de bit por densidad de potencia de ruido (E_b/N_o) para el enlace de tráfico de reversa en el caso de descarga es:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{T' L'_o(\theta_o, d_o) G_o(\theta_o)}{I'_n + N} \left(\frac{W}{R} \right) \quad \text{Ec. 4.18}$$

donde

- T' = ERP del canal de Tráfico hacia atrás del móvil de prueba; se asume que el patrón de transmisión es omnidireccional.
- $L'_o(\theta_o, d_o)$ = ganancia de antena receptora de la estación base anfitriona en la dirección θ_o al móvil de prueba.
- $G_o(\theta_o)$ = ganancia de antena receptora de la estación base anfitriona en la dirección θ_o al móvil de prueba.
- I'_n = potencia recibida en el móvil de prueba de otras fuentes de interferencia originadas por sistemas no CDMA. Este término es incluido para acomodar todas las otras posibles fuentes de interferencia que podrían estar presentes en el sistema en la banda CDMA.
- N = potencia de ruido térmico.
- (W/R) = Ganancia de procesamiento.

La ecuación 4.18 se obtiene de las deducciones mostradas en el anexo D.

Como en el caso del enlace hacia delante, uno puede definir un umbral E_b/I_o para el móvil de prueba de tal forma que no mantenga satisfactoriamente un enlace hacia atrás por mucho tiempo. La simulación y las medidas de campo muestran que, en promedio, un umbral de E_b/N_o de 9 dB es suficiente. Se aprecia también que una de las características de un sistema CDMA es el soft handoff, donde las señales recibidas en dos estaciones base diferentes (o sectores) provienen del mismo móvil y están combinadas; esto es,

$$(E_b/N_o)_{\text{eff}} = f \left[(E_b/N_o)_0, (E_b/N_o)_1, (E_b/N_o)_2 \right] \quad \text{Ec. 4.19}$$

donde $(E_b/N_0)_k$ = relación de la energía de bit a densidad de potencia de ruido recibida en la k -ésima estación base (o sector). La estación base (o sector) 0 está definido como el mejor servidor.

La ganancia del soft handoff depende de la red específica involucrada y de la distribución de las celdas en la vecindad. En el caso de la determinación del SAB, se usa la mejor E_b/N_0 del servidor como se definió en la ecuación (4.18). Resolviendo (4.18) para $L'_0(\theta_0, d_0)$

$$L'_0(\theta_0, d_0) = \frac{\frac{E_b}{N_0}(I'_n + N)}{T'G_0(\theta_0)} \frac{1}{(W/R)} \quad \text{Ec. 4.20}$$

Dada la altura h y un radial θ_0 para una antena de una celda en particular, las pérdidas de trayecto hacia delante y hacia atrás $L_0(\theta_0, d_0)$ y $L'_0(\theta_0, d_0)$ son funciones de la distancia d_0 .

Existen muchos modelos de propagación que se usan para predecir las pérdidas de trayecto (p.e., Lee, Hata, y otros). Aquí utilizaremos el modelo de Lee; simplificado para sistemas celulares para un radial d y una altura de antena h de una celda en particular, por ser un modelo sencillo y que proporciona datos muy confiables. La pérdida de trayecto (en decibeles) como una función de la distancia d es

$$L(d) = -147.7 - 38.4 \log(d) + 20 \log(h) \quad \text{Ec. 4.21a}$$

y $L(d) = L'(d)$

donde d está en millas y h en pies. Convirtiendo (4.21a) a unidades internacionales, se obtiene

$$L(d) = -129.45 - 38.4 \log(d) + 20 \log(h) \quad \text{Ec. 4.21b}$$

donde d está en kilómetros y h en metros. Convirtiendo (4.21b) a una ecuación lineal

$$L(d) = 1.14 \times 10^{-13} d^{-3.84} h^2 \quad \text{Ec. 4.21c}$$

donde d está en kilómetros y h en metros. Sustituyendo (4.21c) en (4.17), se obtiene

$$d_f = 4.26 \times 10^{-4} h^{0.521} \left(\frac{\frac{E_c}{I_0} \left\{ G \sum_{k=1}^K P_k(\theta_k) L_k(\theta_k, d_k) + I_n + N \right\}}{\alpha_0 P_0(\theta_0) \left(1 - \frac{E_c}{I_0 \alpha_0} \right) G} \right)^{-0.26} \quad \text{en km Ec.4.22}$$

Sustituyendo (4.21c) en (4.20)

$$d_r = 4.26 \times 10^{-4} b^{0.521} \left(\frac{E_b}{N_0} \frac{(I'_n + N)}{T' G_0(\theta_0)} \frac{1}{(W/R)} \right)^{-0.26} \quad \text{en km, Ec. 4.23}$$

Para aplicar las anteriores relaciones a nuestro diseño, se debe tener en cuenta los parámetros de los equipos, los parámetros del sistema, las clases de terminales de abonado y el balance del sistema.

En este estudio se está considerando el sistema CDMA2000 1x, el cual opera en la banda de 800 MHz que fue asignada en la licitación de telefonía celular y que actualmente opera en nuestro país.

Los parámetros de los equipos y su valor pico se describen a continuación:

- **Ptb:** Potencia de salida de la estación base. El valor es ajustable hasta 20 W en equipos CDMA2000 1x; normalmente se usan 37 dBm que equivalen a 5W.
- **Lc:** Pérdida del combinador de RF de la estación base. La pérdida típica de inserción es de 3 dB.
- **Lf:** Pérdidas del filtro de transmisores o receptores, el valor típico es de 3dB.
- **Lb:** Pérdidas del cable alimentador de las antenas de la estación base. Típicamente se tienen pérdidas de 0.03 dB/m. Con una altura típica de 40 metros se tiene una pérdida de 1.2 dB.
- **Gb:** Ganancia de la antena de la estación base. El valor típico para la antena omnidireccional es de 9 dB y para la antena direccional es de 12 dB.
- **Gm:** Ganancia de la antena del móvil, se considera 0 dB.
- **Ptm:** Potencia de la estación móvil. El valor típico para portátiles es 0.6 W (28 dBm).
- **Ld:** Pérdidas de propagación en el enlace de reversa.

4.6.1.1. Cálculo del radio de cobertura de celda

De acuerdo con las zonas de cobertura propuestas en el capítulo 3 y aplicando las anteriores ecuaciones en una herramienta de cálculo diseñada para hallar los radios de las celdas, para cada una de estas se tiene que:

Valores comunes	
Fc	800 Mhz
Ec/lo	-12 dB (ref. 1)
Eb/No	9 dB (ref. 1)
In	-43 dB (ref. 1)
N	-99 dB (ref. 1)
Lc	3 dB
Lf	3 dB
Lb	0.03 dB/m
Gb	9 dBi para antena omnidireccional 12 dBi para antena directiva
Gm	0 db
Ptm	0.6w (28 dBm)
(W/R)	19.311 dB (ref. 1)
hb	40 mts

Celda 1	
Ptb	37dbm
Po	29.8 dBm
αo	26.8 dBm
Gb	9 dBi
lo	-87.71dB
df	2.3209 km
dr	0.6488 km

Celda 2	
Ptb	37dbm
Po	29.8 dBm
αo	26.8 dBm
Gb	12 dBi
lo	-73.64dB
df	2.3204 km
dr	0.7765 km

Celda 3	
Ptb	36 dbm
Po	28.8 dBm
αo	25.8 dBm
Gb	9 dBi
lo	-71.73 dB
df	2.0582 km
dr	0.6488 km

Celda 4	
P_{tb}	34 dbm
P_o	26.8 dBm
α_o	23.8 dBm
G_b	12 dBi
l_o	-72.41dB
df	1.62 km
dr	0.7765 km

Celda 5	
P_{tb}	34 dbm
P_o	26.8 dBm
α_o	23.8 dBm
G_b	12 dBi
l_o	-71.41 dB
df	1.6199 km
dr	0.7765 km

Celda 6	
P_{tb}	37dbm
P_o	29.8 dBm
α_o	26.8 dBm
G_b	9 dBi
l_o	-75.67dB
df	2.3206 km
dr	0.6488 km

El valor de la potencia de las estaciones base, se escogió dentro del rango de potencia manejada por los equipos y de acuerdo al área de cobertura deseada.

Cabe mencionar que los radios de cobertura de las diferentes celdas son aproximados, debido al fenómeno Cell Breathing, es decir, que cuando se maneje un alto nivel de tráfico el radio de cobertura disminuye o en el caso contrario, cuando se maneje un nivel más bajo de tráfico, el radio de cobertura aumenta o se expande.

En la figura 40, se muestra la cobertura de las nuevas celdas CDMA.

4.7. PLANEACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO PN

Se menciono anteriormente que un canal lógico (p.e., piloto, paging, sincronización, o canal de tráfico) se separa de otro canal lógico usando diferentes funciones de Walsh.

También se tiene que además de ser extendido por la función de Walsh, un canal lógico es multiplicado por una secuencia corta PN. Cada canal lógico en el enlace delantero es multiplicado por la misma secuencia corta PN asignada a esa estación base en particular (o sector).

Esta multiplicación por la secuencia PN corta se hace para proporcionar otro nivel de aislamiento entre los enlaces delanteros de diferentes estaciones base. Por ejemplo, supongamos que la estación base 1 transmite un canal de tráfico que usa la función de Walsh 21, y la estación base 2 transmite un canal de tráfico que también usa la función de Walsh 21. Si estas dos estaciones base están próximas la una de la otra, entonces ocurrirá interferencia mutua.

En realidad, el canal de tráfico de la estación base 1 además se multiplica por una secuencia PN corta, y el canal de tráfico de la estación base 2 también se multiplica por una secuencia PN corta diferente. La multiplicación por estas dos diferentes secuencias cortas PN aseguran que todos los canales lógicos (p.e., piloto, paginación, sincronización, y tráfico) de una estación base estén separados de los canales lógicos de otra estación base. Para este propósito, a cada estación base (o sector) se asigna una secuencia corta PN diferente.

4.7.1. Secuencias PN cortas (Short PN Sequences)

Cada secuencia PN corta se genera usando un registro de desplazamiento con 15 elementos binarios. La longitud de tal sucesión PN es aproximadamente 2^{15} , o 32,768 chips. Si se cambia una secuencia PN en un chip, entonces se habrá generado una secuencia PN diferente. Por consiguiente, dado que la secuencia PN es de 32,768 chips de longitud, podríamos generar y usar teóricamente aproximadamente 32,768 secuencias PN diferentes, y se tendría 32,768 secuencias PN diferentes disponibles para asignar a diferentes estaciones base.

Un problema con esto es que una diferencia de un chip entre las diferentes secuencias PN proporciona un aislamiento muy pequeño en un ambiente de comunicaciones móviles. Dado que la tasa de transmisión es 1.2288 Mcps, la duración de cada chip es:

$$\frac{1}{1.2288 \times 10^6 \text{ chips}} = 0.81380 \times 10^{-6} \text{ seg} = 0.81380 \mu\text{Seg}$$

Un tiempo de duración de 0.81380 μ seg. corresponde a una distancia de propagación de 244.14m; es decir, $(0.81380 \times 10^{-6} \text{ seg.}) (3 \times 10^8 \text{ m/seg.}) = 244.14 \text{ metros}$. Donde $3 \times 10^8 \text{ m/seg}$ es la velocidad de la luz.



Figura 40. Cobertura estaciones base CDMA. Ciudad de Cal

Ahora supongamos que hay dos estaciones base: estación base 1 y estación base 2. La secuencia PN de la estación base 1 difiere de la de la estación base 2 en un chip.

Un móvil está alejado 488m de la estación base 1 y 244m de la estación base 2 (Figura 41).

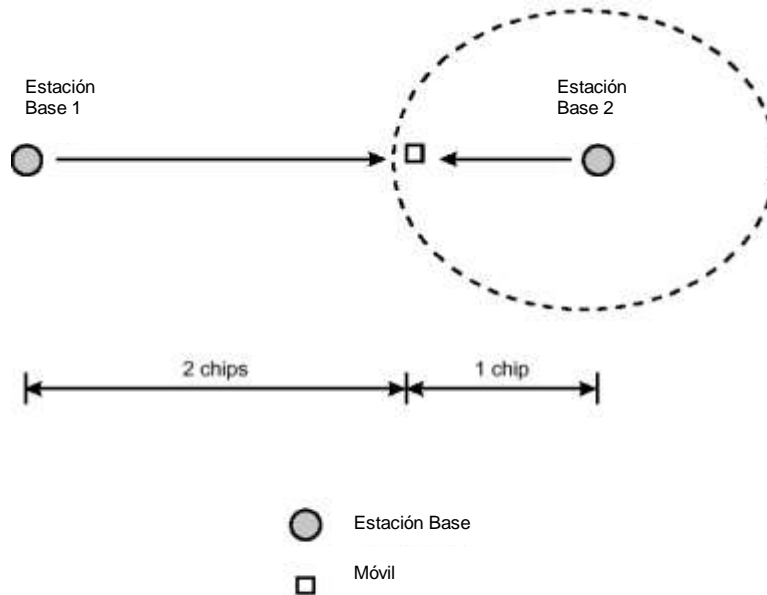


Figura 41. Una situación donde un móvil no puede distinguir las secuencias PN recibidas de dos estaciones base.

Una distancia de 488m corresponde a un retraso de dos chips, mientras una distancia de 244m corresponde a un retraso de un chip. Por consiguiente, la secuencia PN que llega al móvil desde la estación base 1 aparecería al móvil como una secuencia PN con un cambio de dos chips, y la secuencia PN que llega al móvil desde la estación base 2 aparecería como una sucesión de PN con un cambio de un chip.

Estas dos secuencias PN recibidas no pueden distinguirse entre sí. En otras palabras, el móvil no sabría qué secuencia PN viene de cual estación base (ver Figura 42).

Para proporcionar más aislamiento entre secuencias PN que puedan asignarse (usarse), la norma IS-95 especifica que las secuencias útiles PN deben tener una separación mínima de 64 chips la una de la otra. Cada secuencia útil PN está definida por su desplazamiento PN. Por ejemplo, una secuencia PN con desplazamiento de PN 1 es diferente de una secuencia PN con desplazamiento de PN 0 por 64 chips, mientras que una secuencia PN con desplazamiento de PN 4 es diferente de una secuencia PN con desplazamiento PN 0 por $4 \times (64 \text{ chips}) = 256 \text{ chips}$.

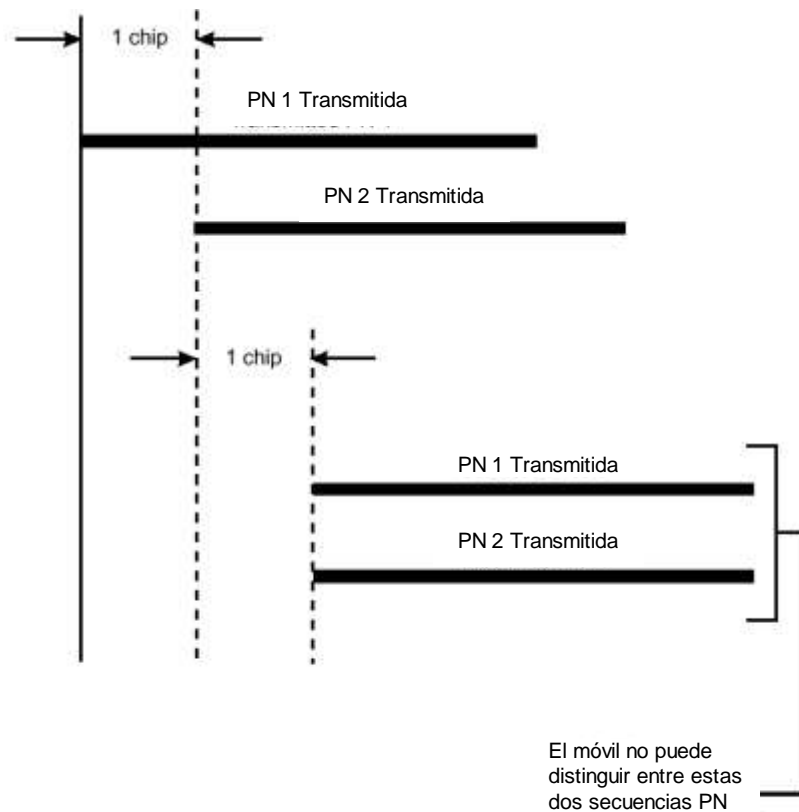


Figura 42. Secuencias PN en el dominio del tiempo. La gráfica corresponde a la situación descrita en la figura 41.

Especificando una separación mínima de 64 chips, el número total de secuencias utilizables PN llega a ser $(32\ 768 \text{ chips}/64 \text{ chips}) = 512$.

Por consiguiente, dado que hay una separación mínima de 64 chips, el número máximo de sucesiones de PN utilizables es 512. Es decir, el máximo número de estaciones base o sectores diferentes que se pueden tener es de 512.

Teniendo en cuenta el número máximo de estaciones base que pueden existir, en nuestro diseño no se presenta ningún problema, ya que para dar servicio celular CDMA a la ciudad del Cali solo es necesario utilizar 6 estaciones base, de las cuales tres están divididas en tres sectores cada una y las otras tres no tienen sectorización. Por esta razón se necesita un total de 12 secuencias PN para nuestra red.

El objetivo es asignar desplazamientos PN disponibles a los diferentes sectores de tal manera que haya una mínima confusión entre las diferentes secuencias PN recibidas por el móvil.

5. CONFIGURACION DE LA RED

En esta etapa del proyecto, donde se tiene diseñada y dimensionada la red, se presenta un resumen de cada uno de los parámetros con los cuales la red celular CDMA para la ciudad de Cali entraría en operación.

En este capítulo se encontrarán reunidas cada una de las características de la red que en los capítulos anteriores se dedujeron con sus respectivos procedimientos.

5.1 PARAMETROS DE LAS ESTACIONES BASE Y CCM DE LA RED

La red diseñada consta de 6 estaciones base y de 1 centro de conmutación móvil. Por facilidad las estaciones base CDMA se ubicarán en el mismo lugar de algunas de las estaciones base de la red celular TDMA existentes, y el centro de conmutación móvil se ubicará en el mismo lugar de la estación base de la celda 2, ya que en esta se maneja un alto nivel de tráfico.

Estación Base 1	
Ubicación	UNICENTRO. Cra. 96 # 6-51 La playita
Latitud	3° 22' 42" N
Longitud	76° 32' 44" W
Tipo	Omnidireccional
Tipo antena	DB874H-120X
Altura Torre	40 mts
E.R.P	29.8 dBm

Estación Base 2	
Ubicación	DEPARTAMENTAL. Cra. 44 # 10A - 05
Tipo	Sectorizada
Latitud	3° 25' 09" N
Longitud	76° 22' 22" W
Altura Torre	40 mts
Sector X	
Tipo Antena	DB874H-120X
E.R.P	29.8 dBm
Azimut	0°
Sector Y	
Tipo Antena	DB874H-120X
E.R.P	29.8 dBm
Azimut	120°
Sector Z	
Tipo Antena	DB874H-120X
E.R.P	29.8 dBm
Azimut	240°

Estación Base 3	
Ubicación	SANTA MONICA. Cra. 23 Cll 31N
Tipo	Omnidireccional
Tipo antena	DB809K-XC
Latitud	10° 26' 30" N
Longitud	76° 30' 46" W
Altura Torre	40 mts
E.R.P	28.8 dBm

Estación Base 4	
Ubicación	EDIFICIO BANCO DE OCCIDENTE. Cll 8 entre Cra.8 y Cra. 5
Tipo	Sectorizada
Latitud	3° 27' 12" N
Longitud	76° 32' 21" W
Altura Torre	40 mts
Sector X	
Tipo Antena	DB874H-120X
E.R.P	26.8 dBm
Azimut	0°
Sector Y	
Tipo Antena	DB874H-120X
E.R.P	26.8 dBm
Azimut	120°
Sector Z	
Tipo Antena	DB874H-120X
E.R.P	26.8 dBm
Azimut	240°

Estación Base 5	
Ubicación	AVENIDA 6. Avenida 6N # 25-00
Tipo	Sectorizada
Latitud	3° 28' 14" N
Longitud	76° 32' 06" W
Altura Torre	40 mts
Sector X	
Tipo Antena	DB874H-120X
E.R.P	26.8 dBm
Azimut	0°
Sector Y	
Tipo Antena	DB874H-120X
E.R.P	26.8 dBm
Azimut	120°
Sector Z	
Tipo Antena	DB874H-120X
E.R.P	26.8 dBm
Azimut	240°

Estación Base 6	
Ubicación	EL SENA. Cll 51 # 1G-48 Barrio Salomia
Tipo	Omnidireccional
Tipo antena	DB809K-XC
Latitud	3° 28' 17" N
Longitud	76° 03' 00" W
Altura Torre	40 mts
E.R.P	29.8 dBm

5.2 SEÑALIZACION

El intercambio de datos entre centrales de conmutación con el fin de establecer una comunicación entre usuarios o para ofrecerles facilidades o servicios especiales, no sería posible sin los protocolos de señalización.

Los sistemas de señalización usados por la central celular para la comunicación con otras centrales ya sean de la red telefónica pública conmutada (RTPC) u otros operadores celulares e la misma área, se describen a continuación.

5.2.1 Señalización por canal asociado (R2)

Este tipo de señalización está compuesta por señales de línea y de registro, cuando estas dos señales van por el mismo canal telefónico por donde van a hablar los usuarios y queda establecida la comunicación se denomina FDM.

Esta señalización puede ser usada por la central para comunicarse con la RTPC y otros operadores en la misma área en caso que no sea posible la comunicación por CCS7. Para la comunicación de la estación base con los abonados se usa el protocolo IS-95 para llamadas digitales.

5.2.2 Señalización por canal común

Son mensajes estructurados que viajan a través de la red de señalización que está superpuesta a la red de conmutación de circuitos. En Colombia se encuentran en servicio dos redes de señalización de este tipo.

Señalización IS-41: Sigue la norma ANSI y es usada únicamente en la central celular para comunicarse con centrales celulares de otras áreas y que prestan el servicio de roaming entre abonados.

Señalización ISUP: Para el establecimiento de llamadas telefónicas que siguen las normas del CCITT, es decir, son usadas por la central celular para comunicarse con la RTPC y centrales telefónicas celulares que prestan el servicio en la otra banda en la misma área.

5.3 EQUIPOS CDMA

A continuación se presenta una descripción de los equipos CDMA escogidos para la red diseñada.

5.3.1 Estación Base BTS (Base Transceiver Station)

El BTS de Samsung soporta múltiples portadoras en configuraciones omidireccionales y sectorizadas dentro de un armario sencillo.

El BTS estándar es especialmente recomendado para proveer amplia cobertura en sitios de alto tráfico, tales como centros de ciudades, áreas sub-urbanas, y áreas residenciales.

Cobertura optimizada

Las BTS CDMA2000 de Samsung BTS son pequeñas, resistentes al clima, son unidades que pueden ser fácil y económicamente desplegadas. Las configuraciones predeterminadas como omnidireccional y de tres sectores, simplifican la instalación, minimizan el mantenimiento, y reducen los costos de despliegue.

Crecimiento donde la red necesita crecer

La BTS Samsung CDMA2000 1x es expansible usando un armario de expansión localizado cerca al armario primario para aplicaciones que requieren alta capacidad o incrementar la sectorización. Esto posibilita atender a más usuarios, previniendo la obsolescencia debido al incremento del tráfico. Las opciones flexibles de configuración de este equipo contribuyen a los bajos costos de infraestructura.

Futuras pruebas tecnológicas

La rápida evolución de la tecnología CDMA requiere que los productos CDMA2000 puedan evolucionar más allá de 1X. Los productos Samsung CDMA2000 Radio Access Network están diseñados para dar a los operadores una fácil actualización CDMA2000 1Xev Data Only(DO) y CDMA2000 1Xev Data Voice(DV).

Esta protección de la inversión asegura a los operadores facilitar las cosas para un camino de migración con una excelente relación costo-beneficio.

5.3.1.1 Especificaciones

BTS INTERIORES

- Soporta bandas Celular y PCS
- Soporta Multi sectorización: Omnidireccional, 3 Sectores, 6 Sectores
- Apropiaada para pequeña capacidad: 3FA 3 Sectores con 1Rack
- Gran capacidad con 2 Racks adicionales de extensión: 9FA 3Sector
- Potencia de salida: 20W
- Amplificador de potencia: 50W(60W)
- Interfaz BSC-BTS: Propietaria IPC(ATM)
- Interfaz BTS-MS: IS-2000
- Capacidad de canales por tarjeta: 72 canales
- Tamaño físico del RACK: 1,800 x 800 x 700 (Alto x ancho x grueso) mm
- Peso (Kg/Rack): Max. 400kg

Capacidades futuras

- Modulo Front-end montado en torre (TFM).
- Unidad de pruebas de estación base (BTU).
- Mantenimiento y gestión (MAP).

BTS EXTERIORES

- Soporta bandas Celular y PCS
- Soporta Multi sectorización: Omnidireccional, 3 Sectores, 6 Sectores
- Apropiaada para pequeña capacidad: 3FA 3 Sectores con 1Rack
- Gran capacidad con 2 Racks adicionales de extensión: 9FA 3Sector
- Método de enfriamiento: Híbrido (Agua y Aire)
- Potencia de salida: 20W
- Amplificador de potencia: 50W o 60W
- Interfaz BSC-BTS: Propietaria IPC(ATM)
- Interfaz BTS-MS: IS-2000
- Capacidad de canales por tarjeta: 72Ch
- Tamaño físico del RACK: 1,600 x 1,150 x 1,190 (Alto x Ancho x Grueso) mm
- Peso (Kg/Rack): Max. 650kg

Capacidades futuras

- Peso (Kg/Rack): Max. 650kg
- Modulo Front-end montado en torre (TFM)
- Unidad de pruebas de estación base (BTU)
- Maintenance and Administration (MAP)

5.3.2 Controlador de estación base BSC (Base Station Controller)

Características principales

Para servicios de paquetes de datos de alta velocidad

Su avanzada arquitectura basada en paquetes y soporte para interfaces abiertas da a los operadores la flexibilidad y capacidad para tener éxito en el competitivo mercado de las comunicaciones inalámbricas.

Basada en la plataforma central de Samsung para 3G, la BSC tiene una ventaja económica para aplicaciones de gran y pequeña escala. También está diseñada para soportar la futura migración de CDMA2000 1x EV.

Interfaces abiertas

- Soporte para Control de Acceso al medio IS-2000 (MAC) y control de acceso de los enlaces (LAC) y señalización.
- Interfaz con redes de paquetes e internet
- Interfaz ATM a la 3G BTS
- Mejoras IS-634 y IOS

5.3.2.1 Especificaciones

Capacidad	
Máximo número de canales de voz	1,920 canales/BSC
Máximo número de BTS	64 BTS/BSC
Máximo de llamadas procesadas	60,000 BHCA (Voz) 80,000 BHCA (Datos)
12 BSC interconectadas con una MSC	
Capacidad de conmutación ATM	2.5Gbps (16X16 switch)

Interfaz	
MSC-BSC	IS-634x/IOS 2.2 o 4.0 compatible (64T1/E1 o STM-1)
BSC-BTS	ATM sobre 64 T1 o OC-3
BSC-DCN	MIP/GRE sobre Fast Ethernet

Funcionalidad	
Transcoding	8kbps QCELP/ EVRC, 13 kbps QCELP
Soft Handoff entre-BTS/BSC	
Gestión de canal, BTS/BSC O&M	
Cancelación de Eco, Selección de trama por diversidad	
Servicio de datos	Velocidad máxima de datos 144Kbps (1X)

5.3.3 Centro de Conmutación Móvil. MSC (Mobile Switching Center)

Su arquitectura modular de Hardware y Software permite a los operadores modificar y/o actualizar fácilmente la funcionalidad del sistema, incorporar innovaciones tecnológicas futuras rápida y económicamente

El centro de conmutación móvil Samsung SDX CDMA2000 está diseñado para entregar un desempeño superior, flexibilidad y capacidades de internetworking hoy y en el futuro.

Un sistema público de conmutación de alta capacidad el cual incorpora gestión de movilidad, el MSC se interconecta con más grandes ambientes de red, incluyendo la red telefónica pública conmutada, la Red Digital de Servicios Integrados y plataformas avanzadas de red inteligente (AIN).

Características Principales

- Es modular y altamente expansible
- Rápido tiempo de procesamiento y alta capacidad de tráfico
- Redundancia incluida y alta confiabilidad
- Tolerante a fallos y de alta disponibilidad
- Networking global y compatibilidad con múltiples redes
- Alto desempeño y capacidad
- Gestión efectiva de datos
- Funciones distribuidas y múltiples servicios
- Alta calidad de servicio
- Soporta los estándares IS-41D/E (TMSI, IMSI, NDSS, OTAF, Dirección de llamada, etc.)

- Soporta Frame Relay/PRI
- Versión del libro blanco No.7 aplicada
- Función de conmutación multicanal para servicios de circuitos de datos
- MIN/MDN aplicadas por separado

5.4 ANTENAS PARA SISTEMAS CELULARES

Para nuestro diseño y según los datos obtenidos en el dimensionamiento de la red utilizaremos dos tipos de antenas para las estaciones base; antenas omnidireccionales y antenas directivas. Los dos tipos de antenas poseen polarización vertical porque se ha demostrado experimentalmente que esta se comporta mejor en la banda de los 800 MHz.

Las características de las antenas son las siguientes:

MODELO: DB874H120X

Esta antena contiene tres antenas directivas, una transmisora y dos receptoras con una ganancia total de 11.3 dB, con ella se pueden obtener tilt's mecánicos mediante brackets, la cobertura dada por esta antena tiene un patrón horizontal de 120 grados en los puntos de potencia mitad (3dB), el patrón vertical tiene un ancho de 29 grados (ver figura 43).

La relación front-to-back: 20 dB.
Rango de frecuencias : 820 MHz – 900 MHz
VSWR : 1.4 a 1 o mejor
Potencia de entrada (Max): 500 W
Ancho del lóbulo principal: 120° ± 10°

MODELO DB809K-XC

Antena tipo vela (Por la forma física que tiene) omnidireccional, ideal para ambientes suburbanos o redes pequeñas (Ver figura 44).

Rango de frecuencias: 824 MHz – 900 MHz
VSWR : 1.5 a 1 o mejor
Potencia de entrada (Máx.) : 500 W
Ancho del lóbulo principal: 120° ± 10°

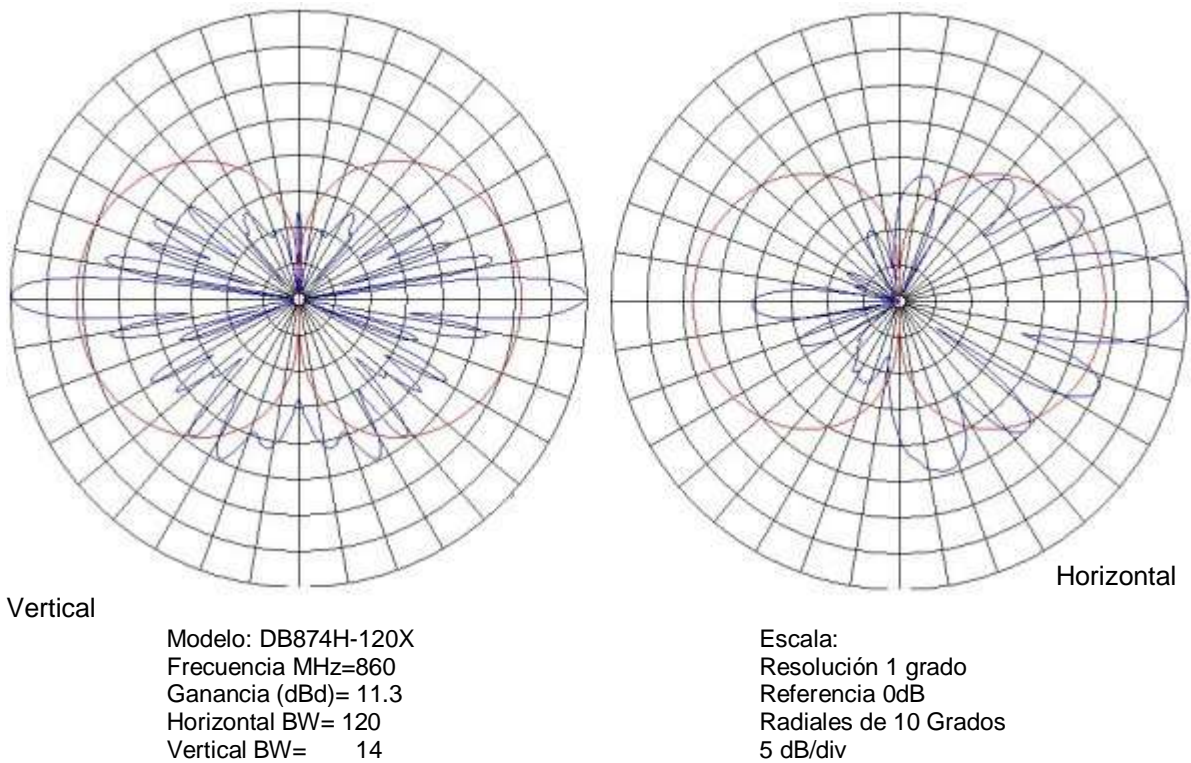


Figura 43. Patrón de radiación de la antena tipo DB87H-120X

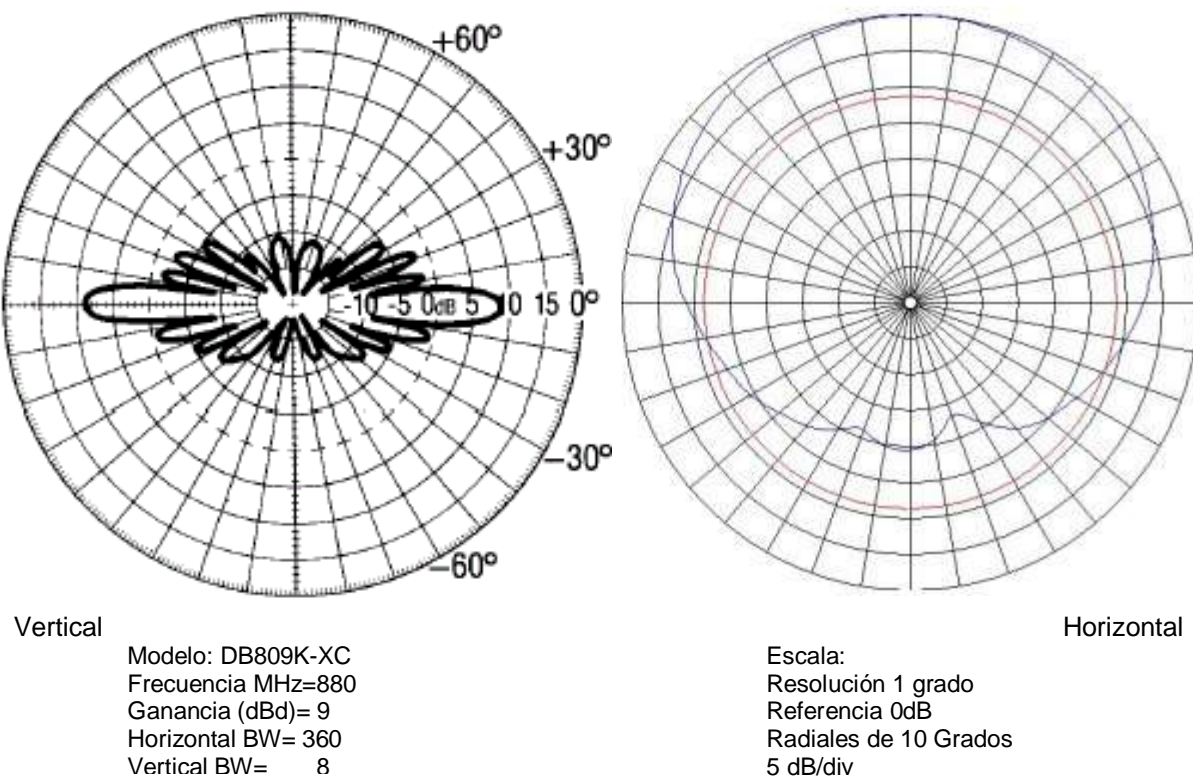


Figura 44. Patrón de radiación de la antena tipo DB809K-XC

CONCLUSIONES

- La tecnología CDMA y su tipo comercial CDMA2000 1x, aunque no son considerados como tercera generación, representan una alternativa muy atractiva para los operadores celulares Colombianos para iniciar el camino de migración de sus redes a la tercera generación de comunicaciones móviles, tanto por su excelente gestión del espectro electromagnético, como por su alta capacidad, seguridad, calidad de voz así como las altas velocidades de datos que maneja.
- CDMA y comercialmente CDMA2000 1x representa la mejor alternativa para los operadores TDMA/IS-136 para iniciar el camino a tercera generación pues aparte de sus características técnicas, sus equipos tanto de infraestructura como terminales móviles están disponibles en la banda de los 800 MHz y existe una gran variedad de estos lo cual permite disminuir sus costos de implementación.
- Gracias al modo dual AMPS/CDMA que presenta el sistema CDMA y comercialmente CDMA2000 1x, un usuario de esta red podrá tener servicio en toda Colombia, ya que en las zonas rurales y principales carreteras del país existe aún servicio analógico.
- La infraestructura CDMA y comercialmente CDMA2000 1x utiliza los mismos protocolos de comunicación entre estaciones base y centros de conmutación móvil así como los mismos protocolos con redes de otros operadores y la red telefónica pública, lo cual facilitará su proceso de instalación y puesta en marcha.
- Debemos tener en cuenta para la planeación de la red que esta sea lo suficientemente flexible para soportar ampliaciones debidas al diario crecimiento del número de usuarios y a las tendencias mundiales en el manejo de Internet móvil ya que se usaron estadísticas aproximadas de tráfico.
- La propagación en una celda CDMA y por lo tanto su cobertura está limitada por el mínimo nivel de señal que podemos tener en recepción para una comunicación

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

óptima. Este nivel, en sistemas CDMA, está especialmente limitado además de la degradación por el trayecto, por la interferencia generada por dispositivos tanto CDMA como no CDMA que trabajan en la banda celular. Por estas razones se dio mucho interés a su estudio y a la forma en que afectan la cobertura de las celdas para encontrar las coberturas teóricas más cercanas a la realidad.

- Para el desarrollo de este tipo de proyectos hay ausencia de herramientas software en nuestra facultad, que permitan determinar una cobertura real, o por lo menos que involucren todos los parámetros necesarios para ofrecer una aproximación que nos permita comparar resultados.
- Los radios de cobertura de las radiobases hallados no son valores fijos debido a las características de las redes CDMA que permiten un ensanchamiento y estrechamiento de estas sino que representan un valor estimado promedio y nos dan una noción de la cobertura de la nueva red.
- Este proyecto muestra el paso inicial para la migración de la red TDMA/IS-136 a una red CDMA usando inicialmente una portadora CDMA, pues en la realidad los usuarios iniciales serán quienes más consuman, a estos les serán remplazados sus terminales y gradualmente según estrategias de los operadores se darán terminales CDMA a los nuevos usuarios y finalmente remplazando los terminales viejos. A medida que aumente la demanda y por consiguiente el tráfico, se puede considerar en aumentar el número de portadoras realizando para ello los procesos aquí mostrados.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda a los operadores celulares Colombianos los cuales actualmente usan TDMA/IS-136 tomen como camino de migración hacia tercera generación la tecnología CDMA y comercialmente CDMA2000 1x por sus ventajas, facilidades y futuras aplicaciones que permitirán incrementar el número de usuarios que manejan e incrementar la cantidad y calidad de servicios de valor agregado que prestan.
- Para el estudio de tráfico fue desarrollada por los autores del proyecto una pequeña herramienta software que permite analizar el número de canales necesarios para un sistema de comunicaciones móviles según la demanda. Sugerimos retomar esta y realizar una herramienta que permita realizar predicciones de tráfico en el tiempo y logre hacer prospectivas de crecimiento y dimensionamiento de redes móviles.
- En el diseño de la cobertura se desarrolló por parte de los autores una pequeña herramienta de cálculo la cual no toma en consideración muchos parámetros que son de importancia y que por motivos de tiempo y complejidad no fueron adicionados; por esta razón se sugiere la creación de un software que introduzca estos factores y que además pueda dar una predicción de cobertura de este tipo de redes lo cual podría ser un buen proyecto de investigación.
- Es necesario que al realizar proyectos de este tipo la generación, realización y análisis de datos así como de resultados sea tratado desde puntos de vista complementarios de diversas áreas afines que permitan realizar una mejor integración.

ACRONIMOS

ANSI: American National Standard Institute. - Instituto Nacional de Normas Estadounidenses.

AMPS: Advanced Mobile Phone Service. – Servicio Telefónico Móvil Avanzado.

ASK: Amplitud Shift Keying.

ATM: Asynchronous Transfer Mode. Modo de Transferencia Asíncrono.

BCH Code : Bose-Chaudhuri-Hocquenghem Code.

BER: Bit Error Rate. – Tasa de Error de Bit.

CCH: Cellular Control Channel. – Canal de Control Celular

CCITT: Comité Consultivo Internacional de Telecomunicaciones parte de Telecomunicaciones.

CCM: Centro de Conmutación Móvil CCM

CCS: Common Channel Signaling. – Señalización por Canal Común.

CCS7: Common Channel Signaling N°7. - Señalización por Canal Común N° 7.

CDMA: Code Division Multiple Access. – Acceso Múltiple por División de Código.

CGSA: Cellular Geographic Service Area. – Area de Servicio Geográfico Celular.

CTIA: Cellular Communication Industry Association. – Asociación de la Industria de Comunicaciones Celular.

C/I: Relación Portadora / Interferencia

C/N: Relación Portadora / Ruido

DCC: Digital Color Code.

DCCH: Digital Control Channel. – Canal de Control Digital.

DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum. – Espectro Ensanchado por Secuencia Directa.

EBC: Estación Base Celular.

EDGE: Enhanced Data for Global Evolution.

ERP: Potencia Efectiva Radiada.

ESN: Electronic Serial Number. – Número Serial Electrónico.

ETSI: European Telecommunications Standar Institute. – Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones.

FCCH: Forward Control Channel. – Canal de Control hacia Delante.

FHSS: Frequency Hopping Spread Spectrum. – Espectro Ensanchado por Salto en Frecuencia.

FSK: Frequency Shift Keying.

Gbps: Giga bits por segundo.

GMSK: Gaussian Minimum Shift Keying

GPRS: General Packet Radio Service. – Servicio de Radio Paquetes General.

GSM: Global System for Mobile Communication. – Sistema Global para Comunicaciones Móviles.

IMT2000: International Mobile Telecommunications (Norma Americana para 3G)

ISUP: ISDN System User Part. – Parte de Usuario del Sistema RDSI.

ITU: International Telecommunication Union.- Unión Internacional de Telecomunicaciones.

LCR: Locating Channel Receiver.

MAP: Mobile Application Part. – Parte de Aplicación Móvil.

MIN: Mobile Identification Number. – Número de Identificación Móvil.

MSC: Mobile Switching Center. – Centro de Conmutación Móvil.

PCS: Personal Communications Systems. – Sistema de Comunicaciones Personales.

PN: Pseudo Noise. – Seudo ruidoso.

PSK: Phase Shift Keying.

QAM: Quadrature Amplitude Modulation. – Modulación en amplitud de cuadratura.

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying.

RCCH: Reverse Control Channel. – Canal de Control de Reversa.

RF: Radio Frecuencia.

RSSI: Received Signal Strength Indicator. – Indicador de Intensidad de Señal Recibida.

RTPC: Red Telefónica Pública Conmutada.

SAB: Service Area Boundary . – Límite de Area de Servicio.

SAT: Supervisory Audio Tone.- Tono de Supervisión de Audio.

SCC: SAT Color Code.

SID: System Identification. – Identificación del Sistema.

SMS: Short Messages Service. – Servicio de Mensajes Cortos.

ST: Signaling Tone. – Tono de Señalización.

TDMA: Time Division Multiple Access. – Acceso Múltiple por División de Tiempo.

THSS: Time Hopping Spread Spectrum. – Espectro Ensanchado por Salto en Tiempo.

TIA: Telecommunication Industry Association. – Asociación de la Industria de las Telecomunicaciones.

VCH: Voice Channel. – Canal de Voz.

VMAC: Voice Mobile Attenuation Code.

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System. – Sistema de Telecomunicaciones Móvil Universal. (Norma Europea para 3G)

WCDMA: Wideband Code Division Multiple Access. – Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha.