



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Consideraciones y análisis de la capacidad de tráfico de voz y de datos para redes celulares CDMA

Helmunt Federico Chicol Cabrera

Asesorado por Ing. Luis Eduardo Durán Córdova

Guatemala, abril de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONSIDERACIONES Y ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE TRÁFICO DE
VOZ Y DE DATOS PARA REDES CELULARES CDMA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

HELMUNT FEDERICO CHICOL CABRERA
ASESORADO POR ING. LUIS EDUARDO DURÁN CÓRDOVA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2005

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

Consideraciones y análisis de la capacidad de tráfico de voz y de datos para redes
celulares CDMA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería
Mecánica Eléctrica, con fecha 14 de junio de 2004.

Helmunt Federico Chicol Cabrera

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Peñate
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Adolfo Villeda Vásquez
SECRETARIO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

A:

Ing. Luis Eduardo Durán Córdova, por el valioso tiempo que dedicó a la revisión, asesoría y dirección de este trabajo de graduación, y a la vez, por haberme brindado la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos en mi formación profesional.

Ing. Rodolfo Samayoa y Lic. Amahán Sánchez, quienes me brindaron toda su amistad y conocimientos.

Bellsouth, por brindarme su valiosa colaboración y ayuda desinteresada para que el presente trabajo llegara a feliz término.

ACTO QUE DEDICO

- A DIOS El físico y matemático más grande de todos los tiempos y del universo.
- A LA SANTÍSIMA VIRGEN MARÍA Madre de toda la humanidad, y de nuestro Señor Jesucristo.
- A MIS PADRES Justo Neri Chicol Dian y Natalia Cabrera de Chicol, por darme su cariño, su ejemplo e incondicional apoyo, porque este triunfo alcanzado no es mío, es nuestro.
- A MIS HERMANOS Ing. Germán Leonel e Ing. Carlos Enrique, con cariño.
- A MIS ABUELOS Federico Chicol (Q.E.P.D.)
Tránsito Dian (Q.E.P.D.)
Germán Cabrera (Q.E.P.D.) quiénes están en gloria, y Rosa Vásquez Vda. de Cabrera, por su cariño, cuidados y consejos brindados.
- A MIS TÍAS Teresa y Marquina, con fraternal cariño.
- A MI PRIMA Suliana, con cariño.
- A MIS AMIGOS Luis Fernando, Óscar Sánchez, Luis Girón, Ulises Juárez, César De Paz, Carlos Custodio, Fabio Gudiel, David Dardón, Julio Ajanel, Ferdi Rodríguez, William Martínez, Juan Véliz.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXV
1. INTRODUCCIÓN A LAS REDES DE COMUNICACIONES DE DATOS	1
1.1. Fundamentos de redes de datos.....	1
1.1.1. Redes de área local.....	2
1.1.2. Redes de área metropolitana.....	3
1.1.3. Redes de área amplia.....	4
1.1.4. Redes inalámbricas.....	5
1.1.4.1. Radiotransmisión.....	7
1.1.4.2. Transmisión por microondas.....	8
1.2. Fundamentos de la comunicación de datos.....	9
1.2.1. Modulación ASK.....	9
1.2.2. Modulación <i>FSK</i>	12
1.2.3. Modulación <i>PSK</i>	13
1.2.4. Modulación <i>BPSK</i>	16
1.2.5. Modulación <i>QPSK</i>	19
1.2.5.1. Transmisor <i>QPSK</i>	20
1.2.5.2. Receptor <i>QPSK</i>	21
1.2.6. Modulación <i>QAM</i>	23

1.2.7.	Modulación <i>QASK</i>	25
1.2.8.	Modulación <i>BFSK</i>	31
1.2.9.	Módems.....	34
1.2.9.1.	Módems asíncronos.....	35
1.2.9.2.	Módems síncronos.....	35
1.3.	Modelos de red de datos.....	36
1.3.1.	Modelo <i>OSI</i>	36
1.3.2.	Modelo <i>TCP/IP</i>	40
2.	REDES CELULARES	43
2.1.	Tecnologías digitales de transmisión de voz y datos en redes celulares	43
2.1.1.	<i>CDMA</i>	46
2.1.1.1.	Descripción del sistema <i>IS-95</i>	49
2.1.1.2.	Códigos básicos (<i>AND, XOR</i>).....	51
2.1.1.3.	Secuencias ortogonales.....	54
2.1.1.3.1.	Funciones ortogonales.....	54
2.1.1.3.2.	Generación de códigos ortogonales...	54
2.1.1.3.3.	Expansiones ortogonales.....	57
2.1.1.3.4.	Ejemplo de canalización usando expansión ortogonal.....	57
2.1.1.3.5.	Recuperación de símbolos expandidos.....	58
2.1.1.3.6.	Recuperación de símbolos expandidos usando una función errónea.....	59
2.1.1.3.7.	Un ejemplo del código de expansión con tres suscriptores.....	60
2.1.1.3.8.	Ejemplo de recuperación de un código extendido mediante la compresión.....	61

2.1.1.4.	Códigos de ruido pseudoaleatorios (<i>PN</i>).....	61
2.1.1.4.1.	Balance de códigos <i>PN</i>	62
2.1.1.4.2.	Distribución de unos y ceros.....	63
2.1.1.4.3.	Aislamiento de códigos.....	64
2.1.1.4.4.	Generación de códigos <i>PN</i>	64
2.1.1.4.5.	Enmascarado de códigos <i>PN</i>	65
2.1.1.4.6.	Autocorrelación de un código de ruido pseudoaleatorio.....	67
2.1.1.4.7.	Chips frente a distancia.....	68
2.1.1.5.	Códigos de los canales <i>CDMA</i>	68
2.1.1.6.	Pasos para generar cada código de canal.....	69
2.1.1.6.1.	Generación de canal piloto.....	69
2.1.1.6.2.	Expansión en cuadratura.....	70
2.1.1.6.3.	Filtrado y conversión.....	70
2.1.1.6.4.	Filtro enmascarado 1x.....	71
2.1.1.6.5.	Filtro transmisor.....	72
2.1.1.6.6.	Diagrama en bloques del canal de sincronización.....	72
2.1.1.6.7.	Diagrama de bloques del canal de paginación.....	73
2.1.1.7.	Generación de ondas <i>CDMA</i>	74
2.1.1.7.1.	Tasas de expansión.....	75
2.1.1.7.2.	Diagrama general para el canal de tráfico directo.....	76
2.1.1.7.3.	Generación de tráfico de canal reverso.....	77
2.1.1.8.	Demodulación de canales <i>CDMA</i>	79
2.1.1.8.1.	Demodulación de canal <i>CDMA</i> directo.....	79

	2.1.1.8.2.	Demodulación de canal <i>CDMA</i> reverso.....	80
	2.1.1.9.	<i>CDMA2000-1X</i>	81
2.2.		Diseño y dimensionamiento de un sistema celular de voz.....	83
	2.2.1.	Definición de <i>GOS</i> en un sistema celular.....	83
	2.2.2.	Geometría celular.....	84
	2.2.2.1.	Generación del sistema celular hexagonal.....	86
	2.2.3.	Interferencia cocanal.....	90
	2.2.4.	Dimensionamiento de un sistema celular de voz.....	94
	2.2.5.	Aumento del número de usuarios.....	96
	2.2.5.1.	Disminución del tamaño de las células.....	96
	2.2.5.2.	Sectorización.....	97
	2.2.5.3.	Sistema de <i>offset</i>	98
	2.2.5.4.	Sistema híbrido <i>overlay/underlay</i>	100
	2.2.5.5.	Sistema sin tránsitos.....	101
2.3.		Adaptaciones para transmisión de datos.....	103
	2.3.1.	<i>IS-856</i>	103
	2.3.2.	<i>CDMA2000 (1XRTT)</i>	103
	2.3.2.1.	Problemas del despliegue.....	104
	2.3.2.2.	Arquitectura del sistema.....	107
	2.3.2.3.	Planificación de frecuencia.....	107
	2.3.2.4.	<i>Handoff</i>	108
	2.3.2.5.	Métodos de cálculo de tráfico.....	109
	2.3.2.6.	Despliegue.....	109
	2.3.3.	<i>1xEV-DO</i>	112
	2.3.4.	Interface <i>R-P</i>	113
	2.3.5.	Protocolo de conexión punto a punto (<i>PPP</i>).....	114
	2.3.6.	Nodo de servicio de paquete datos (<i>PDSN</i>).....	119
	2.3.7.	Servicios.....	121

2.3.7.1.	Protocolo de aplicación inalámbrica (<i>WAP</i>).....	121
2.3.7.2.	Mensajería y multimedia (<i>MMS</i>).....	122
2.3.7.3.	Navegación en el internet.....	125
3.	MODELOS DE TRÁFICO TRADICIONALES DE VOZ	127
3.1.	El proceso de <i>Poisson</i>	127
3.2.	Distribución exponencial.....	129
3.3.	Modelos de tráfico según <i>erlang</i>	132
3.3.1.	Número de ocupaciones simultáneas y número de <i>erlang</i>	132
3.3.2.	Primera fórmula de <i>erlang</i> (<i>Erlang B</i>).....	135
3.3.2.1.	Deducción de probabilidades de estado.....	136
3.3.2.2.	Ingeniería de tráfico <i>Erlang B</i>	141
3.3.2.3.	Ejemplo de capacidad de <i>Erlang B</i>	142
3.3.3.	Sistema con memoria o retardo.....	143
3.3.4.	Segunda fórmula de <i>erlang</i> (<i>Erlang C</i>).....	143
4.	ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE TRÁFICO DE VOZ Y DE DATOS SOBRE UNA RED CELULAR <i>CDMA</i>	145
4.1.	Asignación de canales en una red <i>CDMA</i>	145
4.1.1.	Codificación de canal directo en <i>CDMA2000</i>	145
4.1.2.	Codificación de canal reverso en <i>CDMA2000</i>	146
4.1.3.	Estimación de la capacidad de radio en <i>CDMA</i>	147
4.2.	Modelos de tráfico en <i>CDMA2000</i>	149
4.2.1.	Códigos <i>Walsh</i>	150
4.2.2.	Tasas de paquete de datos.....	151
4.3.	Asignación de canales para una llamada de datos.....	154
4.3.1.	Características de los datos.....	154

4.3.2.	Sesiones de búsqueda en Web (<i>HTTP</i>).....	155
4.3.3.	Modelo <i>FTP</i> (<i>file transfer protocol</i>).....	156
4.3.4.	Protocolo <i>RTP/RTCP</i> y <i>RTSP</i>	157
4.3.5.	Medida de datos.....	160
4.3.6.	Ingeniería de tráfico de datos basada en el uso de información disponible.....	162
4.4.	Medición y análisis de tráfico de datos.....	162
4.5.	Análisis de tráfico de voz.....	171
4.6.	Impacto en la infraestructura de la red.....	172
4.7.	Análisis de la existencia de una relación entre la unidad de medida de tráfico de voz y la unidad de medida de tráfico de datos.....	173
4.7.1.	Verificación de la existencia de la relación entre la unidad de medida de tráfico de voz y la unidad de medida de tráfico de datos.....	174
CONCLUSIONES		175
RECOMENDACIONES		177
BIBLIOGRAFÍA		179

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Modelos de red simplificados	1
2	Dos redes de difusión	2
3	Arquitectura de la red de área metropolitana <i>DQDB</i>	4
4	Relación entre los <i>hosts</i> y la subred	5
5	Computadoras individuales móviles y una <i>LAN</i> volante	6
6	En las bandas <i>VL</i> F, <i>V</i> F y <i>M</i> F, las ondas de radio siguen la curvatura de la Tierra y en la banda <i>H</i> F las ondas rebotan en la ionosfera	7
7	Modulación de señal <i>ASK</i>	10
8	Detección de <i>ASK</i>	11
9	Generación de <i>FSK</i>	12
10	Generación de <i>FSK</i> fase continua	13
11	Detección de <i>FSK</i>	14
12	Señal <i>PRK</i>	15
13	Detector de correlación para señales antípodas	15
14	Esquema para recobrar la señal banda/base en <i>BPSK</i>	18
15	Transmisor <i>QPSK</i>	20
16	Receptor <i>QPSK</i>	22
17	Generación de señales <i>QAM</i>	24

18	Constelación <i>QAM</i> de 16 símbolos (cuatro niveles por dimensión)	24
19	Representación geométrica de las 16 señales en el sistema <i>QASK</i>	26
20	Generación de señal <i>QASK</i>	28
21	Receptor de <i>QASK</i>	29
22	Representación de una manera en la cual una señal <i>BFSK</i> puede ser generada	32
23	Receptor de <i>BFSK</i>	33
24	El modelo <i>OSI</i>	37
25	Ejemplo de uso del modelo <i>OSI</i>	39
26	El modelo de referencia <i>TCP/IP</i>	40
27	Protocolos y redes en el modelo <i>TCP/IP</i> inicial	41
28	Acceso <i>FDMA</i>	44
29	Acceso <i>TDMA</i>	45
30	Secuencias de chips binarios para cuatro estaciones y secuencias de chips bipolares	47
31	Ejemplos de transmisión de <i>chips</i>	48
32	Recuperación de una señal <i>CDMA</i> transmitida por una estación	49
33	Arquitectura del sistema <i>IS-95A/B</i> simplificado	51
34	Función <i>AND</i>	51
35	Función <i>XOR</i>	52
36	Correlación entre dos señales iguales y correlación entre dos señales distintas	53
37	Generación de códigos ortogonales	55
38	Códigos en <i>CDMA</i>	56
39	Expansión ortogonal	57
40	Canalización usando expansión ortogonal	58
41	Recuperación de símbolos expandidos	59

42	Recuperación usando una función errónea	59
43	Ejemplo de expansión con tres usuarios	60
44	Ejemplo de compresión de un código expandido	61
45	Generación de códigos <i>PN</i>	64
46	Estados de los registros de desplazamiento	65
47	El enmascarado causa que el generador produzca la misma secuencia, pero desplazada en el tiempo	66
48	Secuencia producida por un generador de máscara	66
49	Autocorrelación de un código <i>PN</i>	67
50	Distribución de códigos para los canales directos	69
51	Generación de canal piloto	69
52	Expansión en cuadratura	70
53	Filtrado y conversión	71
54	Características del filtro enmascarado	71
55	Respuesta en frecuencia de los filtros digitales 1x y 3x	72
56	Canal de sincronización de tráfico directo	73
57	Canal de paginación de tráfico directo	73
58	Terminología bit, símbolo y chip	75
59	Tasa de expansión 1 y 3	76
60	Generación de canal de tráfico directo	76
61	Generación de canal de tráfico reverso	78
62	Demodulación de canal <i>CDMA</i> directo	80
63	Demodulación de canal <i>CDMA</i> reverso	81
64	Adaptación al sistema real	85
65	Geometría de las celdas básicas	86
66	Generación del sistema celular hexagonal	87
67	Interferencia cocanal para $J = 7$	91
68	Interferencia cocanal para $J = 12$ y $J = 19$	91
69	Interferencia cocanal	93

70	Disminución del tamaño de la celda	97
71	Sectorización	98
72	Sistema de <i>offset</i>	99
73	Sistema de <i>offset</i> de tres canales, $J=4$	100
74	Sistema híbrido <i>overlay/underlay</i>	100
75	Sistema sin tránsitos	102
76	Banda de guarda para un canal simple <i>CDMA2000-1x</i>	105
77	Banda de guarda para dos canales <i>CDMA2000-1x</i>	106
78	Portadoras preferidas para sistemas celulares <i>CDMA</i>	106
79	Requerimientos del espectro de <i>CDMA2000-1x</i> para <i>SMR</i>	107
80	Muestra de distribución del sistema <i>IS-95</i>	110
81	Portadora <i>IS-95</i> desplegada para un sistema de muestra	111
82	Esquema de despliegue de la portadora <i>CDMA2000-1x</i> dentro de un sistema <i>IS-95</i>	111
83	Interface <i>R-P</i>	113
84	Modelo de función del interface <i>R-P</i>	114
85	Tramas de la capa de enlace	115
86	Estructura de paquetes <i>PPP</i>	116
87	Diagrama de estados para configurar y mantener el enlace punto a punto	118
88	Arquitectura del sistema <i>CDMA2000</i>	120
89	Servicio <i>MMS</i>	123
90	<i>IP</i> móvil	126
91	Función de densidad, f , de una $\text{Exp}(\lambda)$	129
92	Función de distribución F de $\text{Exp}(\lambda)$	130
93	Variación en la ocupación de dispositivos	133
94	Número de ocupaciones cambiantes con el tiempo	135
95	Sesión de búsqueda Web	155
96	Llamadas de paquetes (páginas Web)	156
97	Modelo <i>FTP</i>	156

98	Flujo de datos en el sistema <i>CDMA2000</i>	158
99	Interacción de datos y voz en <i>CDMA2000</i>	159
100	Medidas de flujo de datos	161
101	Esquema utilizado en la medición de tráfico de datos	164
102	Gráfica velocidad de transferencia frente a latencia	166
103	Tamaño del canal suplementario asignado a cada una de las muestras de medición	169
104	Interacción de voz y datos con el <i>BSC</i>	171
105	Asignación de canal fundamental y suplementario a n usuarios	172

TABLAS

I	Combinación de redes inalámbricas y computación móvil	5
II	Relación de los voltajes $p_H(t)$ y $p_L(t)$ con los valores $d(t)$	32
III	Distribución de unos y ceros	63
IV	Anchos de banda en <i>CDMA2000</i>	82
V	Capacidades estimadas para voz y datos en <i>CDMA</i>	82
VI	Posibles valores de J	88
VII	$J = f(n)$	90
VIII	Esquema de asignación de portadora en el sistema <i>CDMA2000-1x</i>	104
IX	Esquema de asignación de portadora en un sistema <i>PCS</i> <i>CDMA2000-1x</i>	105
X	Desplazamientos PN	108
XI	Tabla de compatibilidad del <i>Handoff</i>	109

XII	Tabla <i>EV-DO</i>	112
XIII	Tabla de bloqueo <i>Erlang B</i>	141
XIV	Parámetros de capacidad de <i>CDMA</i>	147
XV	Códigos <i>Walsh</i> en <i>CDMA2000</i>	151
XVI	Tasa de paquete de datos	152
XVII	Tasa de datos e interacción con el proceso de ganancia	153
XVIII	Muestras obtenidas en la medición de tráfico de datos	165
XIX	Comparación entre la velocidad de transferencia medida y la calculada	167
XX	Porción de canal suplementario asignada a cada una de las muestras de medición	168
XXI	Porcentaje de utilización del canal suplementario en cada medición	170

GLOSARIO

AMPS	<i>(advanced mobile phone system</i> , sistema avanzado de telefonía móvil), inventado por los Laboratorios <i>Bell</i> e instalado por primera vez en Estados Unidos en 1982. Con <i>AMPS</i> , una región geográfica se divide en celdas, normalmente de 10 a 20 km de diámetro.
ARPANET	La <i>ARPANET</i> era una red de investigación patrocinada por el <i>D o D</i> (Departamento de Defensa de Estados Unidos). Al final conectó cientos de universidades e instalaciones del gobierno usando líneas telefónicas rentadas.
Autocorrelación	Es la medida de la similitud entre una forma de onda y ella misma.
Bit	Acrónimo para dígito binario. La unidad de información más pequeña almacenada en una computadora. Puede tener dos estados 1 ó 0.
Byte	Una unidad de información usada para representar un caracter alfanumérico y, generalmente, compuesto de 8 bits.
<i>Cdma2000</i>	La tercera generación (3G) del estándar <i>CDMA</i> que es una evolución del estándar existente <i>CdmaOne</i> .

<i>CdmaOne</i>	El estándar <i>CDMA</i> de América del Norte por encima de 100 millones de suscriptores en el 2002.
Celda	Área geográfica servida por una estación base en un sistema telefónico inalámbrico.
Central de conmutación móvil (MSC)	El conmutador central de teléfono está conectado a las estaciones base a la red de conmutación de telefonía pública (<i>PSTN</i>) para manejar llamadas inalámbricas y <i>handoffs</i> .
Cobertura	Denominada el área de servicio de una celda, que proporciona un servicio aceptable para los suscriptores.
Comparador	Es un dispositivo que analiza una señal de voltaje en una entrada, con el voltaje de referencia presente en la otra entrada. Cuya salida depende, si la señal de entrada es mayor o menor que el voltaje de referencia.
Controlador de estación base (BSC)	Es el procesador central de una estación base que administra el procesamiento de llamada, mensajes y <i>handoffs</i> . Algunos sistemas permiten un controlador de estación base para el control de más de una estación base.
Correlación	Es la medida de la similitud o relación entre dos formas de onda.

Chip	Dígito de salida de un generador de código expandido. También es un simple dígito binario.
Efecto doppler	Es un fenómeno donde la frecuencia de radio o sonido cambia, debido a que el transmisor y el receptor se mueven hacia o lejos uno del otro.
Equiprobable	Es un proceso en el cual todos sus eventos tienen igual probabilidad de ocurrencia.
<i>Erlang</i>	Es la demanda de telefonía equivalente a una llamada continua, donde N usuarios usan el teléfono 1/N del tiempo. O simplemente denominado la unidad de medida del tráfico telefónico de voz.
Espectro expandido	Es una tecnología de acceso múltiple donde varios canales usan el mismo rango de frecuencia en el mismo lugar y al mismo tiempo.
Estación base	Es una estación de radio de transmisión y recepción que proporciona el servicio de telefonía inalámbrica.
<i>Ethernet</i>	Es un mecanismo de arbitraje para resolver conflictos cuando dos o más computadoras quieren transmitir simultáneamente. Es una red de transmisión basada en bus con control de operación descentralizado a 10 ó 100 Mbps.

Filtro	Es un dispositivo que se utiliza para eliminar las componentes de frecuencia no deseadas de una señal y permitir el paso de la componente de frecuencia deseada.
<i>Handoff</i>	Es el servicio para cambiar una llamada de una celda, sector, o portadora a otra mientras la llamada está en progreso.
<i>Head-end</i>	Cabeza terminal de cada bus de una red de área metropolitana (<i>MAN</i>), cuya función es la de iniciar la actividad de transmisión.
<i>Host</i>	Es una computadora dedicada a ejecutar programas de usuario o de aplicación.
Información	Eliminación parcial o total de la incertidumbre.
Integrador	Es un dispositivo cuya señal de salida es igual al valor de la integral de la señal de entrada sobre un período T .
<i>Jitter</i>	Variación en la latencia.
Latencia	Término técnico, que indica cuánto tiempo le toma a un dato ir desde un extremo a otro, en una conexión o red.
Módem	Es un dispositivo que transforma un flujo de bits digitales en una señal analógica (modulador) y viceversa (demodulador).
Modulación	Proceso, o resultado del proceso, de variación de algún parámetro de una señal, llamada portadora, de acuerdo con una señal de mensaje.

Móvil	Es una unidad que consta de una unidad de control y un transreceptor que transmite y recibe transmisiones de radio de y hacia el sitio de celda.
Muestreo	Consiste en seleccionar un conjunto de puntos representativos para la variación de una señal analógica.
Ortogonal	Dos vectores cuyo producto interno es cero. Cuando se usa el término ortogonal para más de dos vectores, tiene el significado de que todos los pares de éstos son ortogonales. Visualmente se puede pensar que todos los vectores son perpendiculares uno del otro.
Paquete	Grupo de bits que incluyen datos e información adicional de control. Generalmente se refiere a una unidad de datos del protocolo de la capa de red (capa 3 de <i>OSI</i>).
PLL	El circuito de fase cerrada (<i>PLL</i>), se usa en forma extensa dentro de las comunicaciones electrónicas para realizar la modulación, demodulación, generación de frecuencias, y para síntesis de frecuencias.
Portadora	Frecuencia continua capaz de ser modulada o readaptada por una segunda señal (portadora de información).
Racimo	Conjunto de celdas agrupadas dentro una área geográfica.
Red	Interconexión de dos o más elementos, para transmitir, recibir o intercambiar información.

**Registro de
localización local
(HRL)**

Es una computadora que posee una base de datos de todos los suscriptores que utilizan el servicio de telefonía inalámbrica. El *HLR* tiene la función de ver cuándo toma lugar una llamada inalámbrica, o cuándo la llamada pertenece a un sistema local.

Roaming

Una terminal de usuario que puede ser servida por otro sistema inalámbrico que no es propiamente su sistema al que pertenece.

Señal

Un mensaje o algo parecido. Típicamente se utiliza el término señal para referirse a la componente deseada de energía de radio.

Señal bipolar

Señal que posee dos niveles de voltaje para la representación de una señal binaria, siendo el nivel de + V para representar el 1 lógico y de - V para representar el 0 lógico.

Señal unipolar

Señal que tiene un solo nivel de voltaje + V representando el 1 lógico y el nivel de cero para el 0 lógico.

**Servicio de
multimedia (MMS)**

Es un sistema de mensajería que soporta una amplia variedad de formatos de gráficas y audio.

Slot

Tiempo de servicio asignado a un usuario en la tecnología del acceso múltiple por división de tiempo (*TDMA*).

Tasa de error de bit**(BER)**

Es la fracción de bits recibidos de una señal que son diferentes a los bits enviados.

Tasa de error de**trama (FER)**

Es la fracción de tramas recibidas de una señal que son diferentes de las tramas enviadas. Es típicamente un número mayor que la tasa de error de bit (BER) debido a que la trama es errónea si cualquiera de los bits son incorrectos.

Topología

Posibles arreglos o configuraciones de las redes de computadoras.

Troncal

Medio de enlace entre dos puntos de conmutación.

RESUMEN

La medición y análisis de la capacidad de tráfico de voz y de datos en una red celular es una herramienta importante, tanto en el sentido de administración de los recursos de la red, como también del comportamiento de la red celular ante el crecimiento, en lo que respecta al surgimiento e implementación de nuevos servicios de transmisión de datos en la red. Al inicio un sistema celular fue diseñado solamente para transmitir voz, luego se implementó el servicio de transmisión de datos y creció de manera exponencial, lo cual impacta la infraestructura de la red; por lo tanto, es necesario el estudio de muestras de medición de tráfico, para tener una visión amplia del entorno general de la red celular.

En este caso, se realizaron mediciones de tráfico de datos en una red celular *CDMA*, que consistió en la toma de 10 muestras, que fueron producto de la descarga de un mismo archivo de tamaño fijo a través del sistema operativo de la red, mediante una computadora vía internet inalámbrico, se midieron las cantidades tales como velocidad de transferencia y latencia. Se tomó el valor promedio y, además, el valor máximo y el mínimo de las muestras. Como en una llamada de datos, una red celular asigna a un usuario un canal fundamental de 9.6Kbps y un canal suplementario que tiene un tamaño máximo de 153.6Kbps. Con las mediciones obtenidas se procedió a analizar qué porción de canal suplementario fue utilizado en cada descarga, así como el porcentaje del mismo en base a su tamaño máximo. Con lo referente al tráfico de voz, el canal fundamental es utilizado para este propósito. De esta manera se ve el desempeño de la red y, en un futuro, qué impacto tendría al momento de implementarse un nuevo servicio.

OBJETIVOS

◆ General

Efectuar un análisis de la capacidad de tráfico de voz y de datos para una red de telefonía celular *CDMA*.

◆ Específicos

1. Proporcionar una introducción a las redes de comunicación de datos, fundamentos y modelos de red de datos.
2. Definir qué es una red celular, su diseño y dimensiones, las tecnologías empleadas para la transmisión de voz y datos en la red, como también las adaptaciones para la transmisión de datos en la misma.
3. Describir los modelos de tráfico de voz tradicionales, sus definiciones y características.
4. Medir y analizar el tráfico de voz y datos sobre una red celular *CDMA*.
5. Verificar si existe una relación entre la unidad de medida de tráfico de voz denominada *erlang* y la unidad de medida del tráfico datos denominada Kbps.

INTRODUCCIÓN

Ante el crecimiento de la implementación de nuevos servicios de transmisión de datos en las redes de telefonía celular, es necesario realizar pruebas periódicas que consisten en la toma de muestras de medición de tráfico de datos, que ayudan a administrar y mejorar los recursos existentes dentro de la red. Además, con la aceptación generalizada del internet como el vehículo principal de comunicación externa, para muchas compañías que proveen el servicio celular, es más crítico mantener la red actualizada, porque los usuarios están acostumbrados al acceso instantáneo a información y servicios, y más aun cuando en la red se implementa un nuevo servicio de transmisión de datos.

En el presente trabajo de graduación se analiza la interacción del tráfico de voz y de datos en una red celular *CDMA*, así como también cada una de las pruebas realizadas en la medición de tráfico de datos y, además, la relación que existe entre la unidad de medida del volumen del tráfico de voz con la unidad de medida del tráfico de datos.

Para cubrir lo anteriormente expuesto, este trabajo se estructura de la siguiente manera:

El capítulo I proporciona una introducción a las redes de comunicaciones de datos, fundamentos y modelos de red de datos.

El capítulo II define qué es una red celular y la tecnología *CDMA*.

El capítulo III define los modelos de tráfico de voz.

El capítulo IV describe el análisis de tráfico de datos y de voz en una red celular *CDMA*, y, además, la relación que existe entre el *erlang* (unidad de volumen de tráfico de voz) y el Kbps (unidad de tráfico de datos).

1. INTRODUCCIÓN A LAS REDES DE COMUNICACIONES DE DATOS

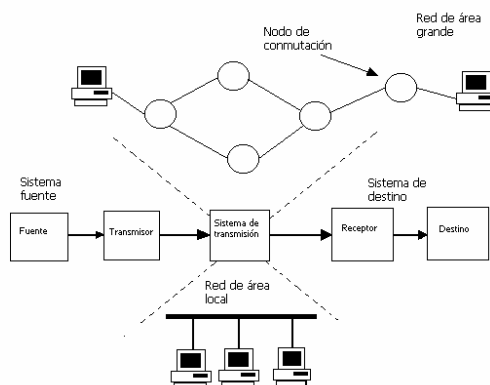
1.1. Fundamentos de redes de datos

A menudo es impráctico que dos dispositivos de comunicación sean conectados directamente en una configuración punto a punto. Esto es para una (o ambas) de las siguientes contingencias:

- Los dispositivos están muy lejos. Esta comunicación es inmoderadamente cara, por ejemplo, si están separados a miles de kilómetros.
- Hay muchos dispositivos, cada uno de los cuales requiere más tiempo que otros para transmitir.

La solución a este problema fue adherir cada dispositivo a una red comunicación, tal como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Modelos de red simplificados

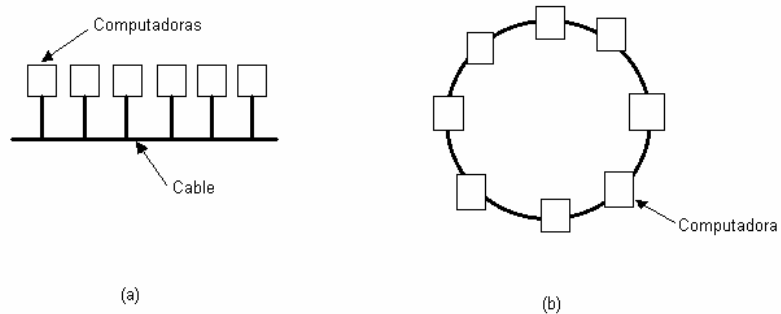


1.1.1. Redes de área local

Las **redes de área local**, generalmente llamadas *LAN* (*local area networks*), son redes de propiedad privada dentro de un solo edificio o campus de hasta unos cuantos kilómetros de extensión. Se usan ampliamente para conectar computadoras personales y estaciones de trabajo en oficinas de compañías y fábricas con objeto de compartir recursos (por ejemplo, impresoras) e intercambiar información.

Las *LAN* de transmisión pueden tener diversas topologías, en la figura 2 se muestran dos de ellas.

Figura 2. Dos redes de difusión (a) bus (b) anillo



FUENTE: Andrew S. Tanenbaum. **Redes de Computadoras**. Pág. 9

En una red de bus (esto es, un cable lineal), en cualquier instante una computadora es la máquina maestra y puede transmitir; se pide a las otras máquinas que se abstengan de enviar mensajes. En un anillo, cada bit se propaga por sí mismo, sin esperar al resto del paquete al cual pertenece. Típicamente, cada bit recorre el anillo entero en el tiempo que toma transmitir unos pocos bits, a veces antes de que el paquete completo se haya transmitido.

Las redes de difusión se dividen en estáticas y dinámicas. Una asignación estática divide el tiempo en intervalos discretos y ejecuta un algoritmo de asignación cíclica, que

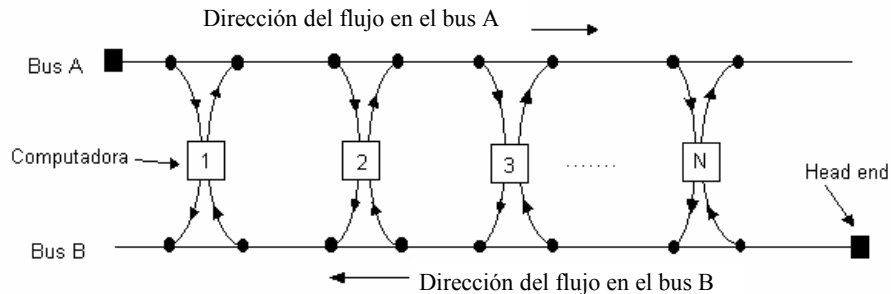
permite a cada máquina transmitir únicamente cuando le llega su turno. Los métodos de asignación dinámica para un canal común son centralizados o descentralizados. En el método de asignación de canal centralizado hay una sola entidad, por ejemplo, una unidad de arbitraje del bus, la cual determina quién es el siguiente. En el método de asignación de canal descentralizado no hay entidad central; cada máquina debe decidir por sí misma si transmite o no.

1.1.2. Redes de área metropolitana

Una **red de área metropolitana**, o *MAN* (*metropolitan area network*) es básicamente una versión más grande de una *LAN* y, normalmente, se basa en una tecnología similar. Podría abarcar un grupo de oficinas corporativas cercanas o una ciudad y podría ser privada o pública. Una *MAN* puede manejar datos y voz e, incluso, podría estar relacionada con la red de televisión por cable local.

El funcionamiento de la *MAN DQDB* (*distributed queue dual bus*, o **bus dual de cola distribuida**) se basa en que dos buses unidireccionales paralelos serpentean a través de una zona (una ciudad), con estaciones conectadas a ambos buses en paralelo. Cada bus tiene un *head-end*, que genera una cadena constante de células de 53 *bytes*. Cada célula viaja corriente abajo del *head-end*. Cuando la célula llega al final, sale del bus, tal como se muestra en la figura 3.

Figura 3. Arquitectura de la red de área metropolitana *DQDB*



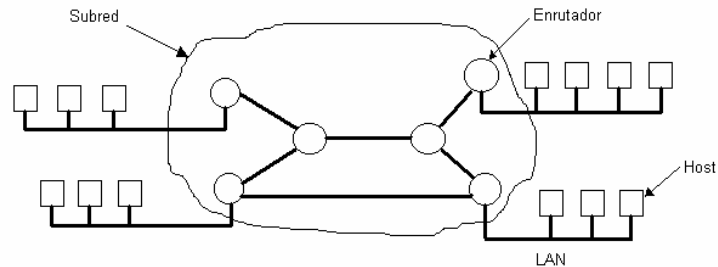
FUENTE: Andrew S. Tanenbaum. **Redes de computadoras**. Pág. 11

1.1.3. Redes de área amplia

Una **red de área amplia**, o *WAN* (*wide area network*), se extiende sobre un área geográfica extensa, a veces un país o un continente; contiene una colección de máquinas dedicadas a ejecutar programas de usuario (es decir, de aplicación). Llamándoseles a estas máquinas *hosts*. Los *hosts* están conectados por una **subred de comunicación**. El trabajo de la subred es conducir mensajes de un *host* a otro.

En muchas redes de área amplia, la subred tiene dos componentes distintos: las líneas de transmisión y los elementos de conmutación. Las líneas de transmisión (también llamadas **circuitos**, **canales** o **troncales**) mueven bits de una máquina a otra. Los elementos de conmutación son computadoras especializadas que conectan dos o más líneas de transmisión. Cuando los datos llegan por una línea de entrada, el elemento de conmutación debe escoger una línea de salida para reenviarlos. En la figura 4 se muestra la relación que existe entre los *hosts* y la subred.

Figura 4. Relación entre los *hosts* y la subred



FUENTE: Andrew S. Tanenbaum. **Redes de computadoras**. Pág. 12

Cada *host* generalmente está conectado a una *LAN* en la cual está presente un conmutador o enrutador, aunque en algunos casos un *host* puede estar conectado directamente a un conmutador o enrutador. La colección de líneas de comunicación y enrutadores forman la subred o transporte.

1.1.4. Redes inalámbricas

Las redes inalámbricas tienen muchos usos. Uno común es la oficina portátil, utiliza equipo electrónico portátil, para enviar y recibir llamadas telefónicas, faxes y correo electrónico, leer archivos remotos, entrar en máquinas remotas etc. Aunque las redes inalámbricas y las computadoras portátiles con frecuencia están relacionadas, no son idénticas, como se muestra a continuación en la tabla I.

Tabla I. Combinación de redes inalámbricas y computación móvil

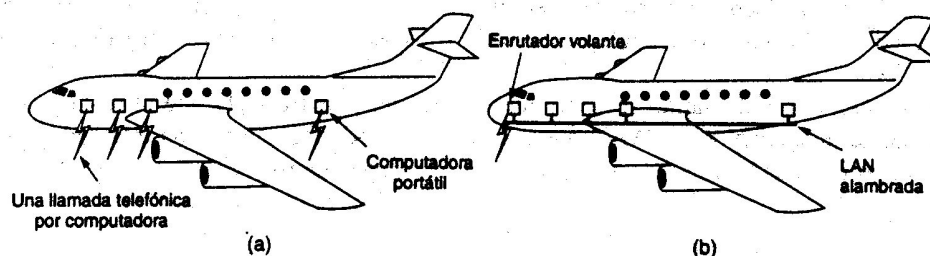
Inalámbrica	Móvil	Aplicaciones
No	No	Estaciones de trabajo estacionarias en oficinas
No	Sí	Uso de una portátil en un hotel; mantenimiento de trenes
Sí	No	<i>LAN</i> en edificios viejos y sin alambrado
Sí	Sí	Oficina portátil; <i>PDA</i> para inventarios

FUENTE: Andrew S. Tanenbaum. **Redes de computadoras**. Pág. 14

Las computadoras portátiles en ocasiones se conectan a redes alámbricas. Las *LAN* inalámbricas son fáciles de instalar, aunque también tienen sus desventajas. Típicamente, su capacidad efectiva es de 1 a 2 Mbps, lo cual es mucho más lento que las *LAN* alámbricas. Además, las tasas de error son a veces mucho más altas, y las transmisiones desde diferentes computadoras pueden interferirse.

Es posible tener diferentes combinaciones de redes alámbricas e inalámbricas. Por ejemplo, en la figura 5 se muestra un aeroplano con varias personas usando módems y teléfonos fijos al asiento para llamar a la oficina.

Figura 5. a) Computadoras individuales móviles b) Una *LAN* volante



FUENTE: Andrew S. Tanenbaum. **Redes de computadoras**. Pág. 15

Cada llamada es independiente de las otras. Sin embargo, una opción mucho más eficiente es la *LAN* del inciso b). Aquí cada asiento viene equipado con una conexión *Ethernet* a la cual los pasajeros pueden conectar sus computadores. Un enrutador simple en el avión mantiene un enlace de radio con algún enrutador en tierra, cambiando de enrutador según avanza el vuelo. Esta configuración es una *LAN* tradicional, excepto que su conexión al mundo externo resulta ser un enlace de radio en lugar de una línea alámbrica.

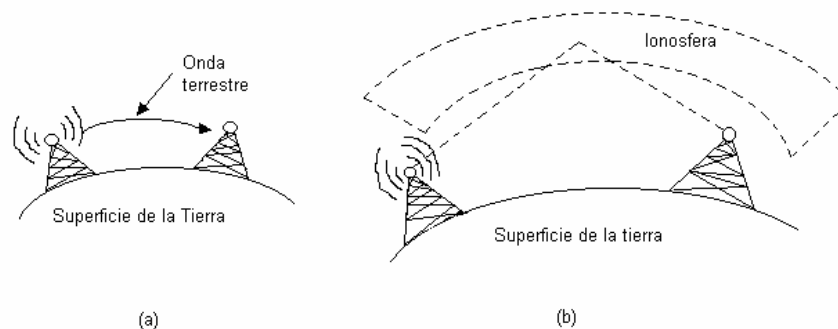
1.1.4.1. Radiotransmisión

Las ondas de radio son fáciles de generar, pueden viajar distancias largas y penetrar edificios sin problemas, de modo que se utilizan mucho en la comunicación, tanto en interiores como en exteriores.

Las propiedades de las ondas de radio dependen de la frecuencia. A bajas frecuencias, las ondas de radio cruzan bien los obstáculos, pero la potencia se reduce drásticamente con la distancia a la fuente, aproximadamente en proporción $1/r^3$ en el aire. A frecuencias altas, las ondas de radio tienden a viajar en línea recta y a rebotar en los obstáculos. También son absorbidas por la lluvia. En todas las frecuencias, las ondas de radio están sujetas a interferencia.

En las bandas *VLF*, *LF*, *MF*, las ondas de radio siguen el terreno, como se muestra en la figura 6.

Figura 6. a) En las bandas *VLF*, *VF* y *MF*, las ondas de radio siguen la curvatura de la Tierra. b) En la banda *HF* las ondas rebotan en la ionosfera



FUENTE: Andrew S. Tanenbaum. **Redes de computadoras**. Pág. 98

Estas ondas se pueden detectar quizás a 1000 km en las frecuencias más bajas, y a menos en frecuencias más altas.

En las bandas *HF* y *VHF*, las ondas a nivel del suelo tienden a ser absorbidas por la Tierra. Sin embargo, las ondas que alcanzan la ionosfera, una capa de partículas cargadas que rodea a la Tierra a una altura de 100 a 500 km, se refractan y se envían de regreso al planeta.

1.1.4.2. Transmisión por microondas

Por encima de los 100 MHz las ondas viajan en línea recta y, por tanto, se pueden enfocar en un haz estrecho. Concentrar toda la energía en un haz pequeño con una antena parabólica produce una señal mucho más alta en relación con el ruido, pero las antenas transmisora y receptora deben estar bien alineadas entre sí.

Además, esta direccionalidad permite a transmisores múltiples alineados en una fila comunicarse con receptores múltiples en fila, sin interferencia. Antes de la fibra óptica, estas microondas formaron durante décadas el corazón del sistema de transmisión telefónica de larga distancia. El sistema entero se basó originalmente en torres de microondas.

Las microondas viajan en línea recta, si las torres están muy separadas, partes de la Tierra causarían un obstáculo para la transmisión. En consecuencia, se necesitan repetidoras periódicas. Cuanto más altas sean las torres, más separadas pueden estar. La distancia entre las repetidoras se eleva en forma muy aproximada con la raíz cuadrada de la altura de las torres.

A diferencia de las ondas de radio a frecuencias más bajas, las microondas no atraviesan bien los edificios. Además, aun cuando el haz puede estar bien enfocado en el transmisor, hay cierta divergencia en el espacio. Algunas ondas pueden refractarse en las capas atmosféricas más bajas y tardar un poco más en llegar que las ondas directas. Las ondas diferidas pueden llegar fuera de fase con la onda directa y cancelar así la señal.

Este efecto se llama **desvanecimiento de trayectoria múltiple** y con frecuencia es un problema serio que depende del clima y de la frecuencia. Algunos operadores mantienen el 10% de sus canales inactivos como repuesto para activarlos cuando el desvanecimiento de trayectoria múltiple cancela en forma temporal alguna banda de frecuencia.

La comunicación por microondas se utiliza para comunicación telefónica de larga distancia, los teléfonos celulares, la distribución de la televisión y otros usos.

1.2. Fundamentos de la comunicación de datos

La información digital puede ser codificada mediante señales analógicas o digitales. La elección de un tipo particular de codificación dependerá de los requisitos exigidos del medio de transmisión.

1.2.1. Modulación ASK

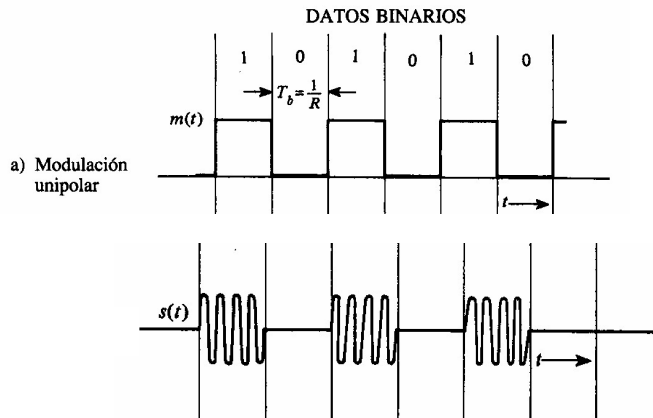
Transmisión por desplazamiento de amplitud (*ASK*, por sus siglas en inglés: *amplitude shift keying*), la cual consiste en activar o desactivar (conmutar) una portadora senoidal con una señal binaria unipolar. La transmisión de radio del código Morse es un ejemplo de esta técnica. Por consiguiente, la técnica *ASK* fue una de las primeras técnicas de modulación que se utilizó y precede a los sistemas de comunicación analógicos.

La señal *ASK* está representada por:

$$s(t) = A_c m(t) \cos \omega_c t \quad (1.1)$$

donde $m(t)$ es una señal de datos de banda/base unipolar, como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Modulación de señal ASK



FUENTE: Leon W. Couch II. **Sistemas de comunicación digitales y analógicos**. Pág. 333

Por consiguiente, la envolvente compleja simplemente es:

$$g(t) = A_c m(t) \quad \text{para ASK} \quad (1.2)$$

La densidad espectral de potencia de esta envolvente compleja es proporcional a la de la señal unipolar, esta densidad de potencia es igual a:

$$\mathcal{P}_g(f) = \frac{A_c^2}{2} \left[\delta(f) + T_b \left(\frac{\sin \pi f T_b}{\pi f T_b} \right)^2 \right] \quad \text{para ASK} \quad (1.3)$$

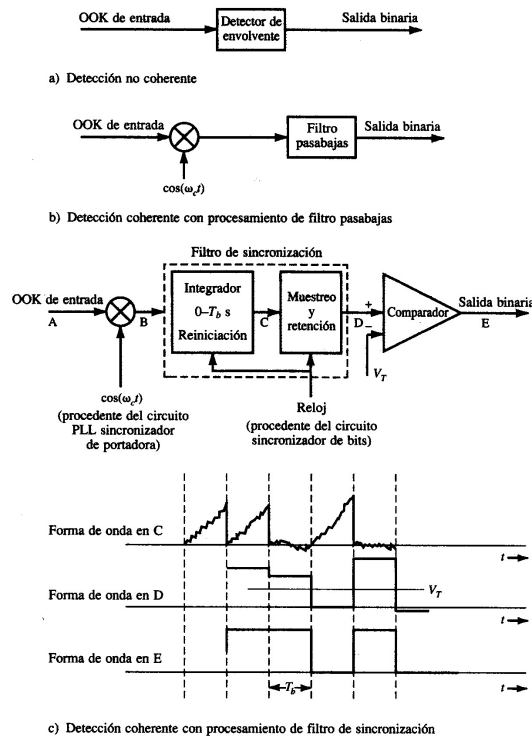
En donde $m(t)$ tiene un valor pico de $\sqrt{2}$ de modo que $s(t)$ tiene una potencia normalizada promedio de $A_c^2/2$. La densidad espectral de potencia de la señal ASK correspondiente es igual a:

$$\rho_s(f) = \frac{A_c^2}{8R} \left(\frac{\sin(\pi(f - f_c)/R)}{\pi(f - f_c)/R} \right)^2 \quad (1.4)$$

En donde $R = 1/T_b$ es la tasa de bits donde el ancho de banda para una señal es $B_T = 2B$ donde B es el ancho de banda/base puesto que *ASK* es una señalización tipo *AM*.

Una señal *ASK* se puede detectar con un detector de envolvente (detección no coherente) o un detector de producto (detección coherente) porque es una forma de señalización *AM*. Estos detectores se muestran en la figura 8.

Figura 8. Detección de ASK



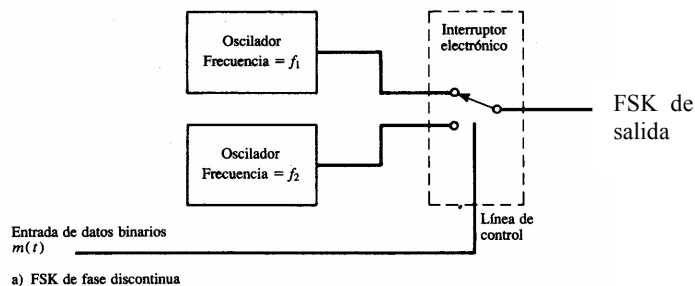
Para la detección de producto se debe proporcionar la referencia portadora, $\cos(\omega_c t)$. Ésta casi siempre se obtiene con un circuito *PLL*, donde el *PLL* se engancha a un término de portadora discreta de la señal *ASK*.

1.2.2. Modulación *FSK*

La transmisión por desplazamiento de frecuencia (*FSK*, por sus siglas en inglés: *frequency shift keying*), consiste en desplazar la frecuencia de una portadora senoidal, desde una frecuencia de marca hasta una frecuencia de espacio de acuerdo con la señal banda/base digital. Es idéntica a modular una portadora de *FM* con una señal digital binaria.

La señal *FSK* se puede caracterizar como uno de dos tipos diferentes, según el método utilizado para generar la señal *FSK*. Un tipo se genera conmutando la línea de salida del transmisor entre dos diferentes osciladores, como se muestra en la figura 9.

Figura 9. Generación de *FSK*



FUENTE: Leon W. Couch II. **Sistemas de comunicación digitales y analógicos**. Pág. 338

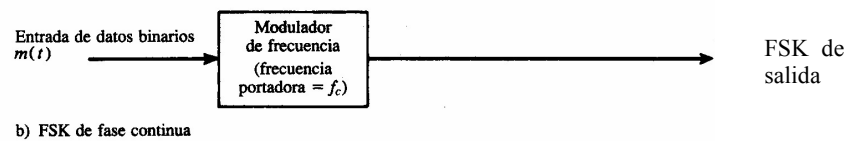
Este tipo genera una forma de onda de salida discontinua en los instantes de conmutación. Se llama *FSK de fase discontinua* porque $\theta(t)$ es discontinua en los instantes de conmutación. La señal *FSK* de fase discontinua está representada por:

$$s(t) = \begin{cases} A_c \cos(\omega_1 t + \theta_1) & \text{con } t \text{ en el intervalo de tiempo} \\ & \text{cuando se envía un 1 binario} \\ A_c \cos(\omega_2 t + \theta_2) & \text{con } t \text{ en el intervalo de tiempo} \\ & \text{cuando se envía un 0 binario} \end{cases} \quad (1.5)$$

Donde f_1 es la frecuencia de marca (1 binario) y f_2 la frecuencia de espacio (0 binario). Este tipo de transmisor solamente muestra una manera de generar una señal *FSK*, ya que dichos transmisores no se construyen en la realidad.

El segundo tipo de transmisor que se muestra, utiliza un modulador de frecuencia, tal como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Generación de *FSK* fase continua



FUENTE: Leon W. Couch II. **Sistemas de comunicación digitales y analógicos**. Pág. 338

La señal *FSK* de *fase continua* se genera alimentando la señal de datos a un modulador de frecuencia. Esta señal *FSK* está representada por la siguiente ecuación:

$$s(t) = A_c \cos \left[\omega_c t + D_f \int_{-\infty}^t m(\lambda) d\lambda \right] \quad (1.6)$$

o

$$s(t) = \text{Re} \{ g(t) e^{j\omega_c t} \} \quad (1.7)$$

donde

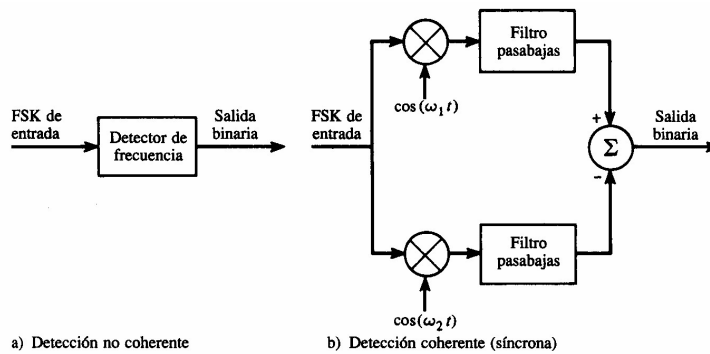
$$g(t) = A_c e^{j\theta(t)} \quad (1.8)$$

$$\theta(t) = D_f \int_{-\infty}^t m(t) dt \text{ con FSK} \quad (1.9)$$

y $m(t)$ es una señal digital de bandabase. Aunque $m(t)$ es discontinua en el instante de conmutación, la función de fase $\theta(t)$ es continua porque $\theta(t)$ es proporcional a la integral de $m(t)$. Si la forma de onda de entrada de datos seriales es binaria, tal como una señal de banda/base polar, la señal *FSK* se llama señal *FSK* binaria. Desde luego, una señal de entrada de niveles múltiples (multinivel) produce una señal *FSK* de niveles múltiples (multinivel).

La *FSK* puede detectarse ya sea con un detector de frecuencia (no coherente) o con dos detectores de producto (detección coherente), como se muestra en la figura 11.

Figura 11. Detección de *FSK*



FUENTE: Leon W. Couch II. **Sistemas de comunicación digitales y analógicos**. Pág. 345

1.2.3. Modulación *PSK*

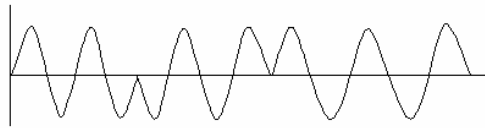
En la modulación *PSK*, la fase de la señal portadora se conmuta entre dos (o más) valores en respuesta al respectivo código binario de entrada (como puede ser un código *PCM*). Para *PCM* binaria, un desplazamiento de fase de 180° es una elección

conveniente porque simplifica el diseño del modulador y se usa a menudo. Esta elección particular se conoce como *conmutación por inversión de fase (PRK, phase reversal keying)*. La señal *PRK* se puede escribir como:

$$\begin{aligned}\varphi_1(t) &= A \sin \omega_c t, \\ \varphi_2(t) &= -A \sin \omega_c t\end{aligned}\tag{1.10}$$

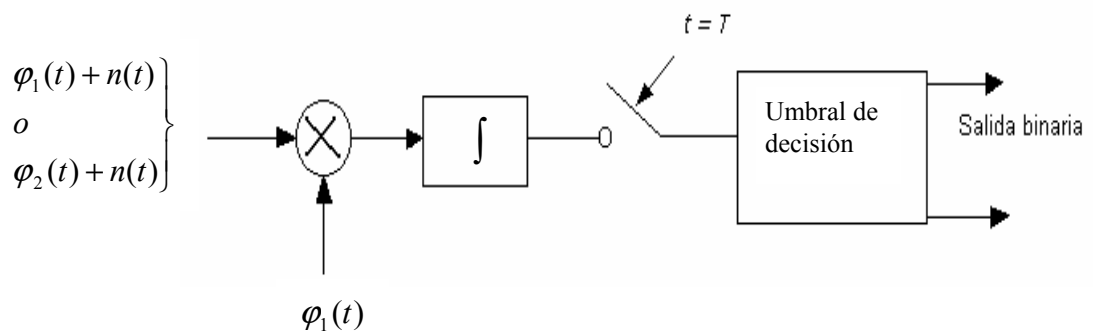
En la figura 12 se muestra una señal *PRK*.

Figura 12. Señal *PRK*



Para la detección de una señal *PRK*, se utiliza un detector de correlación, como se muestra en la figura 13.

Figura 13. Detector de correlación para señales antípodas



FUENTE: Comunicaciones digitales. s.d.e.

1.2.4. Modulación *BPSK*

En la transmisión por desplazamiento de fase binaria (de sus siglas en inglés *binary phase shift keying*), la transmisión de la señal es una senoidal de amplitud fija. Dicha señal presenta una fase fija cuando se transmite un nivel constante de datos, cuando el nivel de datos cambia a otro nivel la fase cambia a 180° . Puede, entonces, hacerse la analogía de transmisión de “1” y “0” binarios. Si la amplitud de la señal senoidal es “A”, entonces la potencia promedio de la señal es $P_s = \frac{1}{2}A^2$ donde: $A = \sqrt{2P_s}$. La señal transmitida es igual a:

$$v_{BPSK}(t) = \sqrt{2P_s} \cos(\omega_o t) \quad (1.11)$$

o

$$v_{BPSK}(t) = \sqrt{2P_s} \cos(\omega_o t + \pi) \quad (1.12)$$

$$= -\sqrt{2P_s} \cos(\omega_o t) \quad (1.13)$$

en *BPSK* los datos $b(t)$ son dígitos binarios con niveles de voltajes, en los cuales por conveniencia se toman los siguientes valores $+1V$ y $-1V$. Cuando $b(t) = 1V$ se toma como nivel lógico “1” y cuando $b(t) = -1V$, se toma como nivel lógico “0”, entonces, la señal *BPSK* puede ser escrita de la siguiente forma, sin perder la originalidad de las ecuaciones anteriores:

$$v_{BPSK}(t) = b(t)\sqrt{2P_s} \cos \omega_o t \quad (1.14)$$

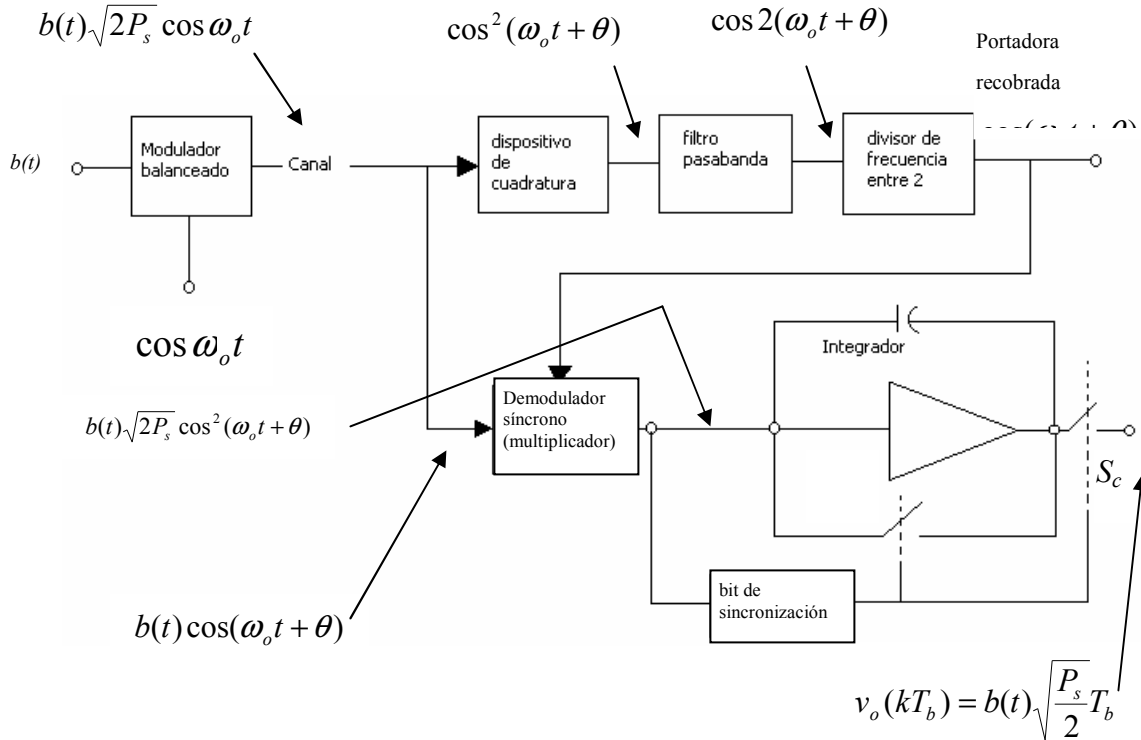
En la práctica, una señal *BPSK* es generada por la aplicación de la forma onda $\cos \omega_o t$, como una portadora, a un modulador balanceado y la señal banda/base $b(t)$ como la forma de onda modulante. En este sentido se puede pensar de la señal *BPSK* como una señal *AM*.

Para la recepción de una señal *BPSK*, la señal recibida tiene la siguiente forma:

$$v_{BPSK}(t) = b(t)\sqrt{2P_s} \cos(\omega_o t + \theta) = b(t)\sqrt{2P_s} \cos \omega_o(t + \theta / \omega_o) \quad (1.15)$$

El ángulo θ es nominalmente un desplazamiento de base fijo correspondiente al retardo de tiempo igual θ/ω_o , el cual depende de la distancia del transmisor a el receptor y el desplazamiento de fase producido por los amplificadores en el “frente-extremo” del receptor precedido por el demodulador. Los datos originales son recobrados en el demodulador. La técnica de demodulación usualmente empleada es llamada demodulación síncrona y requiere que en el demodulador se tenga la forma de onda $\cos(\omega_o t + \theta)$. Un esquema para la generación de la portadora en el demodulador y para recobrar la señal banda/base se muestra en la figura 14.

Figura 14. Esquema para recobrar la señal banda/base en BPSK



FUENTE: Herber Taub, Donald Schilling. **Principles of Communication Systems**. Pág. 251

La señal recibida es elevada al cuadrado para generar la señal:

$$\cos^2(\omega_0 t + \theta) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2(\omega_0 t + \theta) \quad (1.16)$$

La componente de dc es removida por el filtro pasabanda cuya pasabanda es centrada alrededor de $2f_0$, se tiene una señal cuya forma de onda es $\cos 2(\omega_0 t + \theta)$. Un divisor de frecuencia (compuesto de un *flip-flop* y un filtro de banda estrecha fijo en f_0) es usado para regenerar la forma de onda $\cos(\omega_0 t + \theta)$. Después de pasar por el demodulador síncrono se genera la siguiente señal:

$$b(t)\sqrt{2P_s} \cos^2(\omega_o t + \theta) = b(t)\sqrt{2P_s} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2(\omega_o t + \theta) \right] \quad (1.17)$$

la cual es aplicada a un integrador. En el esquema de recuperación de la señal se incluye un bit de sincronización. Este dispositivo reconoce el momento preciso el cual corresponde, al final del intervalo de tiempo asignado, a un bit y al inicio del próximo. Hay un momento en que el conmutador S_c se cierra brevemente para descargar el capacitor del integrador, y se abre durante un curso entero de un intervalo de bit resultante, cerrándose nuevamente el conmutador S_c muy brevemente al final del próximo tiempo de bit, y así continua sucesivamente.

El intervalo del bit por simplicidad es igual a T_b , que es igual a la duración de una integral de número de ciclos igual a n de la frecuencia de la portadora f_o , que es $n \cdot 2\pi = \omega_o T_b$. En este caso la salida de voltaje $v_o(kT_b)$ al final de un intervalo de bit se extiende en un tiempo de $(k-1)T_b$ a kT_b , la salida es igual a:

$$v_o(kT_b) = b(kT_b)\sqrt{2P_s} \int_{(k-1)T_b}^{kT_b} \frac{1}{2} dt + b(kT_b)\sqrt{2P_s} \int_{(k-1)T_b}^{kT_b} \frac{1}{2} \cos 2(\omega_o t + \theta) dt \quad (1.18a)$$

$$= b(kT_b)\sqrt{\frac{P_s}{2}} T_b \quad (1.18b)$$

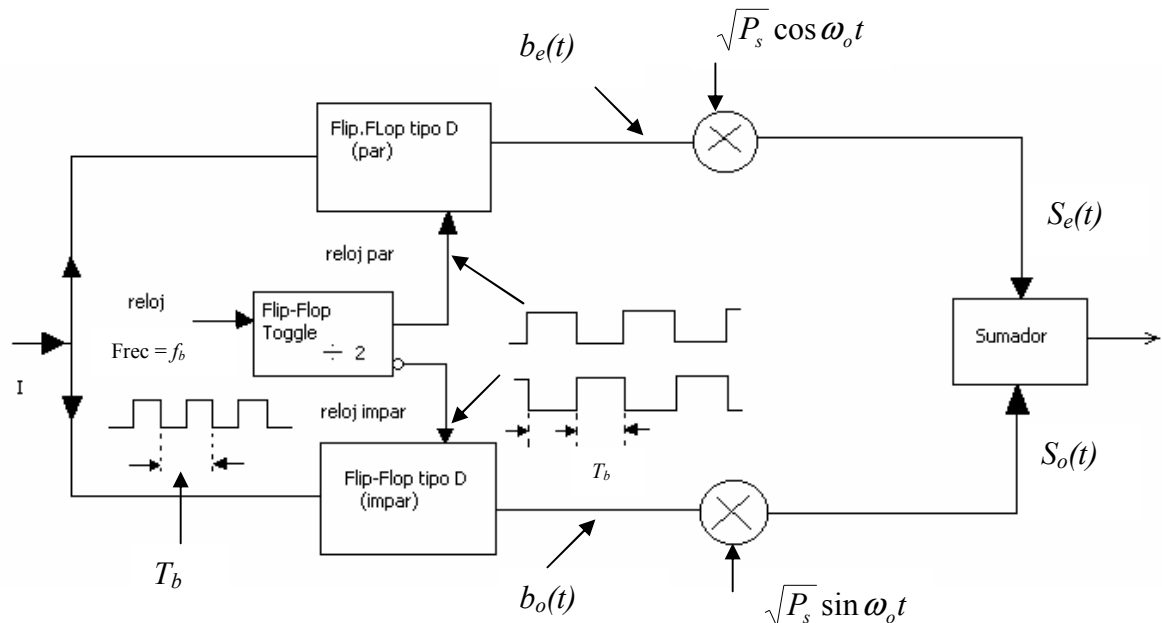
1.2.5. Modulación *QPSK*

Un tren de datos, cuya duración por bit es igual a T_b puede ser transmitida utilizando la modulación de transmisión por desplazamiento de fase en cuadratura (de sus siglas en inglés *QPSK quadrature phase shift keying*). El ancho de banda del canal en transmisión *BPSK* nominalmente es $2f_b$ donde $f_b = 1/T_b$, en transmisión *QPSK*, la transmisión de los bits puede realizarse utilizando medio ancho de banda.

1.2.5.1. Transmisor QPSK

El mecanismo por el cual un tren de bits denominado $b(t)$ se aplica para generar una señal QPSK y a la vez transmitirla, se muestra en la figura 15, ahí se presentan también las ondas relevantes de salida, en dichas formas de onda, se asume que se generan a partir del flanco de bajada del reloj.

Figura 15. Transmisor QPSK



FUENTE: Herber Taub, Donald Schilling. **Principles of Communication Systems**. Pág. 261

El *flip-flop toggle* divide entre dos la forma de onda del reloj cuyo período es el tiempo de duración de un bit denominado T_b , generan dos tipos de onda, una denominada reloj par y la otra reloj impar. Estos relojes tienen períodos iguales a $2T_b$. El ciclo activo de cada uno de los relojes está separado por el tiempo de bit T_b . El tren de bits es aplicado como datos de entrada a ambos *flip-flops* tipo D, uno de los *flip-flops* registra datos a través del ciclo del reloj par y el otro lo hace con el reloj impar. Los *flip-*

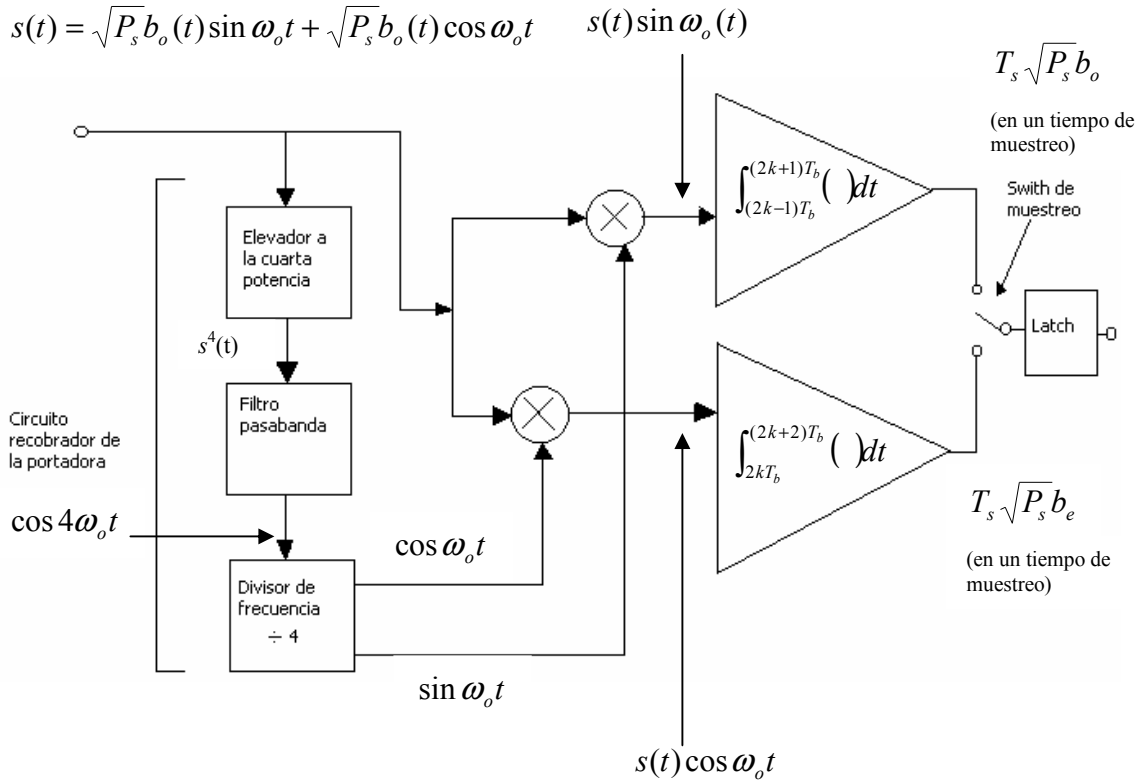
flops registran bits alternados del tren de bits aplicado y esperan que tales bits sean registrados por dos intervalos de bits, que es para un tiempo $2T_b$. El tren de bits $b_e(t)$ (usualmente se toma como $b_e(t) = \pm 1$ volt), es sobrepuesto sobre una portadora $\sqrt{P_s} \cos \omega_o t$ y el tren de bits $b_o(t)$ (también ± 1 volt) es sobrepuesto sobre una portadora $\sqrt{P_s} \sin \omega_o t$ por el uso de dos multiplicadores (moduladores balanceados), para generar las dos señales $s_e(t)$ y $s_o(t)$. Estas dos señales son sumadas para generar la señal de salida de transmisión $v_m(t)$ la cual es:

$$v_m(t) = \sqrt{P_s} b_o(t) \sin \omega_o t + \sqrt{P_s} b_e(t) \cos \omega_o t \quad (1.19)$$

1.2.5.2. Receptor *QPSK*

El esquema del receptor para una señal *QPSK* se muestra en la figura 16.

Figura 16. Receptor QPSK



FUENTE: Herber Taub, Donald Schilling. **Principles of Communication Systems**. Pág. 264

En este caso, se requiere que la señal entrante sea elevada a la cuarta potencia, luego al pasar a través del filtro se recobrará una señal igual a cuatro veces la frecuencia de la portadora y, finalmente, a través de un divisor de frecuencia, al dividirla entre cuatro se regenera la portadora.

La señal entrante también es aplicada a dos demoduladores síncronos, usualmente multiplicadores (moduladores balanceados), seguidos por un integrador. El integrador integra sobre dos intervalos de bit de duración $T_s = 2T_b$, esto da como resultado el valor acumulado. Idealmente el intervalo $2T_b = T_s$ debería abarcar en una integral un número

de ciclos de portadora. Uno de los demoduladores usa la portadora $\cos \omega_c t$ y el otro la portadora $\sin \omega_c t$.

Como es usual, un bit de sincronización es requerido para estabilizar el inicio y el final de los intervalos de bit de cada tren de bits, y también para que los intervalos de tiempo de integración puedan ser estabilizados. El bit de sincronización es necesario para operar el conmutador de muestreo utilizado en la figura 16 para recuperar la señal *QPSK*. Al final de cada intervalo de integración de cada integrador individual, y justamente antes de dar el resultado o valor acumulado por los integradores, la salida del integrador es muestreada. Las muestras son tomadas alternativamente de uno y del otro integrador, al final de cada intervalo de bit T_b con la ayuda del muestreador con un intervalo de bit T_b . La salida de cada integrador individual es sometida a muestreo a intervalos $2T_b$. Y en la salida del muestreador es recobrado el tren de bits $b(t)$.

1.2.6. Modulación *QAM*

La señalización por medio de portadora en cuadratura, se le llama *modulación de amplitud en cuadratura (QAM)*. En general, las constelaciones de señales *QAM* no están limitadas a contar con puntos de señalización sólo en un círculo (de radio A_c). La señal *QAM* general es:

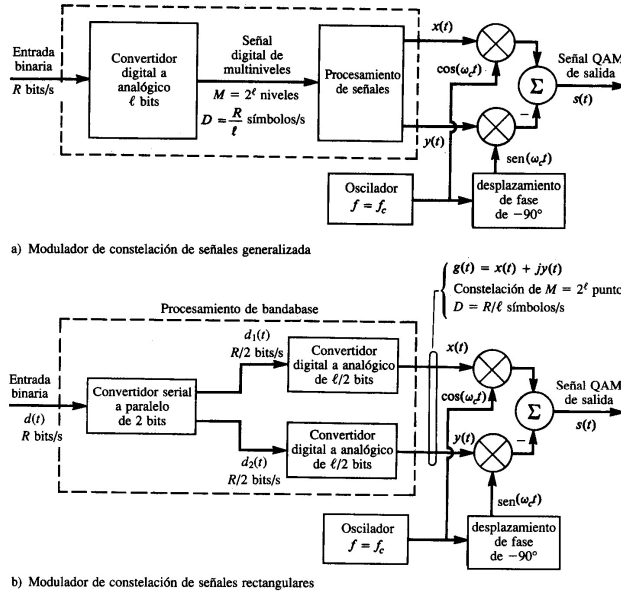
$$s(t) = x(t) \cos \omega_c t - y(t) \sin \omega_c t \quad (1.20)$$

donde

$$g(t) = x(t) + jy(t) = R(t)e^{j\theta(t)} \quad (1.21)$$

En la figura 17 se muestran dos esquemas para la generación de una señal *QAM*.

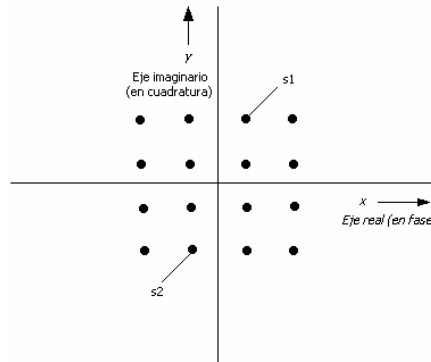
Figura 17. Generación de señales QAM



FUENTE: Leon W. Couch II. **Sistemas de comunicación digitales y analógicos**. Pág. 347

En la figura 18 se muestra una constelación QAM de 16 símbolos ($M = 16$ niveles), donde la relación entre (R_i, θ_i) y (x_i, y_i) se puede evaluar con facilidad por cada uno de los 16 valores de señal permitidos. Este tipo de señalización es utilizado por los módems de computadora de 2400 bits/s V.22 bis.

Figura 18. Constelación QAM de 16 símbolos (cuatro niveles por dimensión)



FUENTE: Leon W. Couch II. **Sistemas de comunicación digitales y analógicos**. Pág. 348

En este caso, se permite que x_i y y_i tengan cuatro niveles por dimensión. Esta señal *QAM* de 16 símbolos se puede generar con dos convertidores ($l/2 = 2$) bit digital a analógico y moduladores balanceados. Las formas de onda de x y y están representadas por:

$$x(t) = \sum_n x_n h_1 \left(t - \frac{n}{D} \right) \quad (1.22)$$

y:

$$y(t) = \sum_n y_n h_1 \left(t - \frac{n}{D} \right) \quad (1.23)$$

donde $D = R/l$ y (x_n, y_n) denota uno de los valores (x_i, y_i) permitidos durante el tiempo necesario para transmitir un símbolo, queda centrado en $t = nT_s = n/D$ seg. (Se requieren T_s seg para enviar cada símbolo) $h_1(t)$ es la forma del pulso utilizado para cada símbolo. Si no se requiere que se limite el ancho de banda de la señal *QAM*, la forma del pulso será rectangular con duración de T_s seg. En algunas aplicaciones, la sincronización entre los componentes $x(t)$ y $y(t)$ se compensa por $T_s/2 = 1/(2D)$ seg. En otras palabras, $x(t)$ se describiría por la ecuación (1.22), y $y(t)$ se compensa y se describiría por:

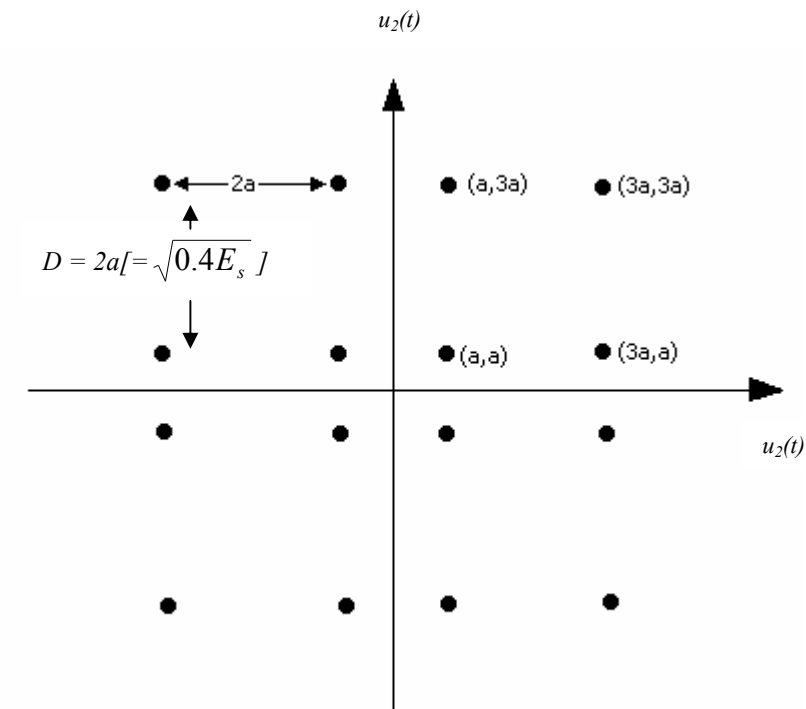
$$y(t) = \sum_n y_n h_1 \left(t - \frac{n}{D} - \frac{1}{2D} \right) \quad (1.24)$$

1.2.7. Modulación *QASK*

En un sistema de comunicación para mejorar la inmunidad al ruido, hace que los vectores de la señal difieran no solamente en su fase, sino que también en su amplitud. Es una amplitud y un desplazamiento de fase. La modulación se da por desplazamiento de amplitud en cuadratura (de sus siglas en inglés *QASK quadrature amplitude shift keying*).

Suponiendo que se quiere transmitir un símbolo de 4 bits, entonces, hay $2^4 = 16$ diferentes posibles símbolos, que generan 16 señales distinguibles. Una posible representación geométrica de las 16 señales se muestra en la figura 19.

Figura 19. Representación geométrica de las 16 señales en el sistema QASK



FUENTE: Herber Taub, Donald Schilling. **Principles of Communication Systems**. Pág. 273

En esta configuración cada punto de la señal está a igual distancia de los otros puntos, la distancia es igual a $d = 2a$. Se asume que todas las señales son equiprobables. De acuerdo con la simetría de la figura 19 se puede determinar la energía promedio asociada con una señal, de las cuatro señales del primer cuadrante, la energía promedio normalizada de una señal es igual a:

$$E_s = \frac{1}{4} \left[(a^2 + a^2) + (9a^2 + a^2) + (a^2 + 9a^2) + (9a^2 + 9a^2) \right] = 10a^2 \quad (1.25)$$

donde:

$$a = \sqrt{0.1E_s} \quad (1.26)$$

y:

$$d = 2\sqrt{0.1E_s} \quad (1.27)$$

cada símbolo representa 4 bits, entonces la energía normalizada del símbolo es $E_s = 4E_b$, donde E_b es la energía normalizada del bit. Las ecuaciones (1.26) y (1.27) quedan de la siguiente forma:

$$a = \sqrt{0.1E_s} = \sqrt{0.4E_b} \quad \text{y} \quad d = 2\sqrt{0.4E_b} \quad (1.28)$$

De acuerdo con la figura 19 de la representación geométrica de la señal 16 *QASK*, una señal típica es:

$$v_{QASK} = k_1 a u_1(t) + k_2 a u_2(t) \quad (1.29)$$

en la cual k_1 y k_2 son iguales a ± 1 o ± 3 . Y además que $u_1(t) = \sqrt{(2/T_s)} \cos \omega_o t$, y que $u_2(t) = \sqrt{(2/T_s)} \sin \omega_o t$, como $a = \sqrt{0.1E_s}$ entonces la ecuación (1.29) puede ser escrita como:

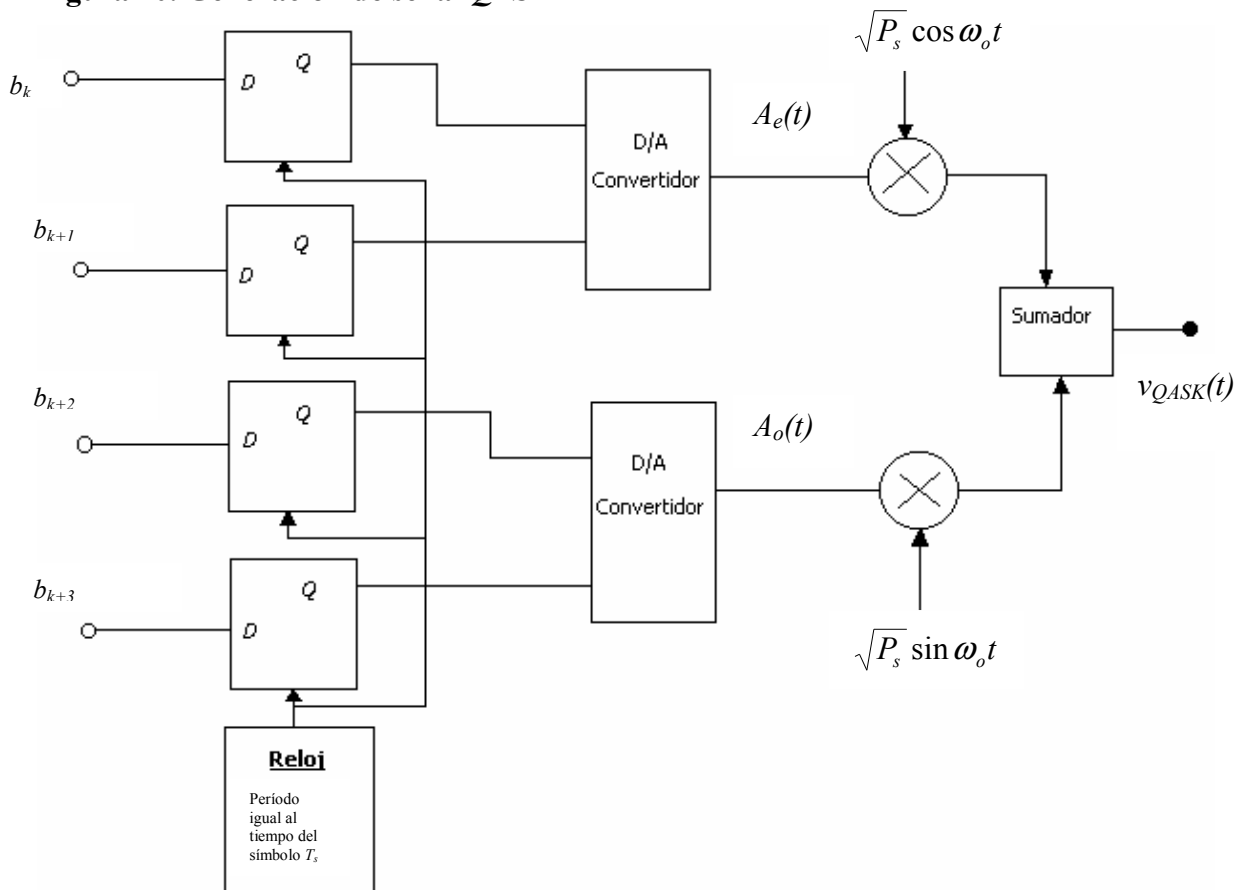
$$v_{QASK} = k_1 \sqrt{0.2 \frac{E_s}{T_s}} \cos \omega_o t + k_2 \sqrt{0.2 \frac{E_s}{T_s}} \sin \omega_o t \quad (1.30)$$

y como $E_s/T_s = P_s$, se tiene entonces:

$$v_{QASK} = k_1 \sqrt{0.2P_s} \cos \omega_o t + k_2 \sqrt{0.2P_s} \sin \omega_o t \quad (1.31)$$

Un generador de señal *QASK* para símbolos de 4 *bits* se muestra en la figura 20.

Figura 20. Generación de señal QASK



FUENTE: Herber Taub, Donald Schilling. **Principles of Communication Systems**. Pág. 274

Los 4 bits de un símbolo $b_{k+3}, b_{k+2}, b_{k+1}, b_k$, son almacenados en un registro de 4 bits, hecho de cuatro *flip-flops* tipo *D*. Un nuevo símbolo es almacenado una vez por intervalos de $T_s = 4T_b$, y el contenido de cada registro correspondiente se actualiza en cada ciclo de reloj, el cual tiene un período igual a T_s . Dos de los bits están presentes en un convertidor digital a analógico (D/A) y los otros dos bits en un segundo convertidor. La salida del primer convertidor $A_e(t)$ se modula a través de un modulador balanceado, cuya portadora de entrada es la función par $\sqrt{P_s} \cos \omega_o t$ y $A_o(t)$ se modula con un modulador con una función impar como portadora. Entonces, la señal transmitida es:

$$v_{QASK}(t) = A_e(t)\sqrt{P_s} \cos \omega_o t + A_o(t)\sqrt{P_s} \sin \omega_o t \quad (1.32)$$

comparando con la ecuación (1.31) se encuentra que:

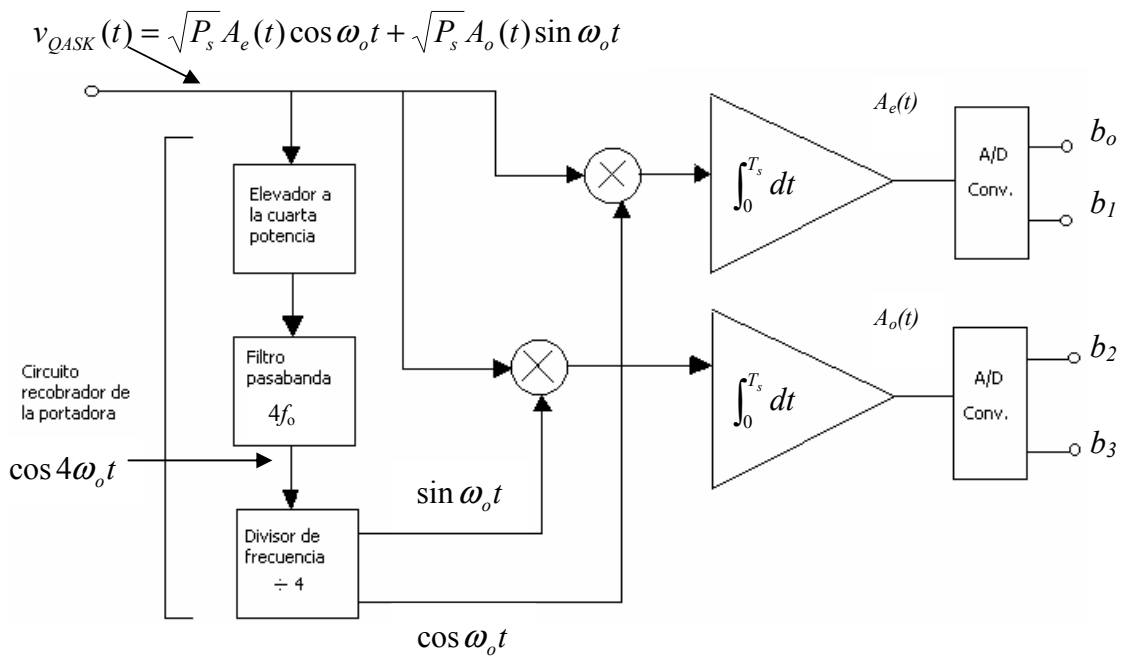
$$A_e, A_o = \pm\sqrt{0.2} \quad \text{o} \quad \pm 3\sqrt{0.2} \quad (1.33)$$

Y ya que todos los cuatro valores de A_e y A_o son igualmente equiprobables, se puede verificar que:

$$\overline{A_e^2} = \overline{A_o^2} = 1 \quad (1.34)$$

El esquema para recuperar una señal $QASK$ se muestra en la figura 21.

Figura 21. Receptor de $QASK$



Al igual que en *QPSK*, las portadoras son recuperadas por medio de elevar la señal *QASK* de entrada a la cuarta potencia, extraen las componentes de frecuencia de $4f_o$, y luego dividen entre cuatro dichas componentes. Como los coeficientes A_e y A_o no son valores fijos, la señal *QASK* elevada a la cuarta potencia es:

$$v_{QASK}^4(t) = P_s^2 (A_e(t) \cos \omega_o t + A_o(t) \sin \omega_o t)^4 \quad (1.35)$$

Si se omiten todos los términos que no tengan componentes de frecuencia $4f_o$, se tiene la siguiente expresión:

$$\frac{v_{QASK}^4(t)}{P_s} = \left[\frac{A_e^4(t) + A_o^4(t) - 6A_e^2(t)A_o^2(t)}{8} \right] \cos 4\omega_o t + \left[\frac{A_e(t)A_o(t)[A_e^2(t) - A_o^2(t)]}{2} \right] \sin 4\omega_o t \quad (1.36)$$

el valor promedio de los coeficientes de $\cos 4\omega_o t$ es distinto de cero mientras que el valor promedio de los coeficientes de $\sin 4\omega_o t$ es cero. Así un filtro de ancho de banda angosto, centrado a $4f_o$ recobrará la señal a la frecuencia $4f_o$.

Luego de lo anterior, ya se tienen disponibles las portadoras en cuadratura, dos moduladores balanceados son utilizados junto con dos integradores, para recobrar las señales $A_e(t)$ y $A_o(t)$. Los integradores tienen un tiempo de integración igual al tiempo de cada símbolo T_s . La sincronización de este tiempo con el del símbolo es requerida. Finalmente, los bits de entrada originales son recobrados por el uso de convertidores analógico a digital.

1.2.8. Modulación *BFSK*

En la transmisión por desplazamiento de frecuencia binaria (de sus siglas en inglés *BFSK binary frequency shift keying*) la forma de onda de datos binarios $d(t)$ genera una señal binaria de la siguiente forma:

$$v_{BFSK}(t) = \sqrt{2P_s} \cos[\omega_0 t + d(t)\Omega t] \quad (1.37)$$

donde $d(t) = +1$ o -1 correspondiente a los niveles lógicos 1 y 0 de los datos de la forma de onda. La señal transmitida es de amplitud $\sqrt{2P_s}$ y es para cualquiera de las siguientes dos ecuaciones:

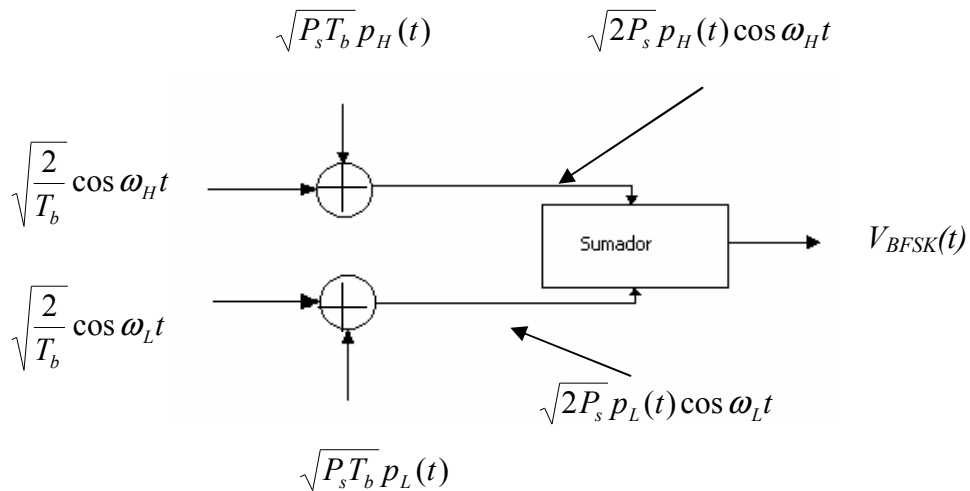
$$v_{BFSK}(t) = s_H(t) = \sqrt{2P_s} \cos(\omega_o + \Omega)t \quad (1.38)$$

o

$$v_{BFSK}(t) = s_L(t) = \sqrt{2P_s} \cos(\omega_o - \Omega)t \quad (1.39)$$

tiene una frecuencia angular $\omega_o + \Omega$ o $\omega_o - \Omega$ siendo Ω una constante de desplazamiento de la frecuencia nominal de la portadora ω_o . Se les llama frecuencia alta $\omega_H (= \omega_o + \Omega)$ y frecuencia baja $\omega_L (= \omega_o - \Omega)$. El esquema para generar una señal *BFSK* se muestra en la figura 22.

Figura 22. Representación de una manera en la cual una señal BFSK puede ser generada



FUENTE: Herber Taub, Donald Schilling. **Principles of Communication Systems**. Pág. 276

Dos moduladores balanceados son usados, uno con una portadora ω_H y el otro con una portadora ω_L . Los valores de los voltajes de $p_H(t)$ y de $p_L(t)$ están relacionados con los valores de voltaje de $d(t)$, tal y como se muestra en la tabla II.

Tabla II. Relación de los voltajes $p_H(t)$ y $p_L(t)$ con los valores $d(t)$

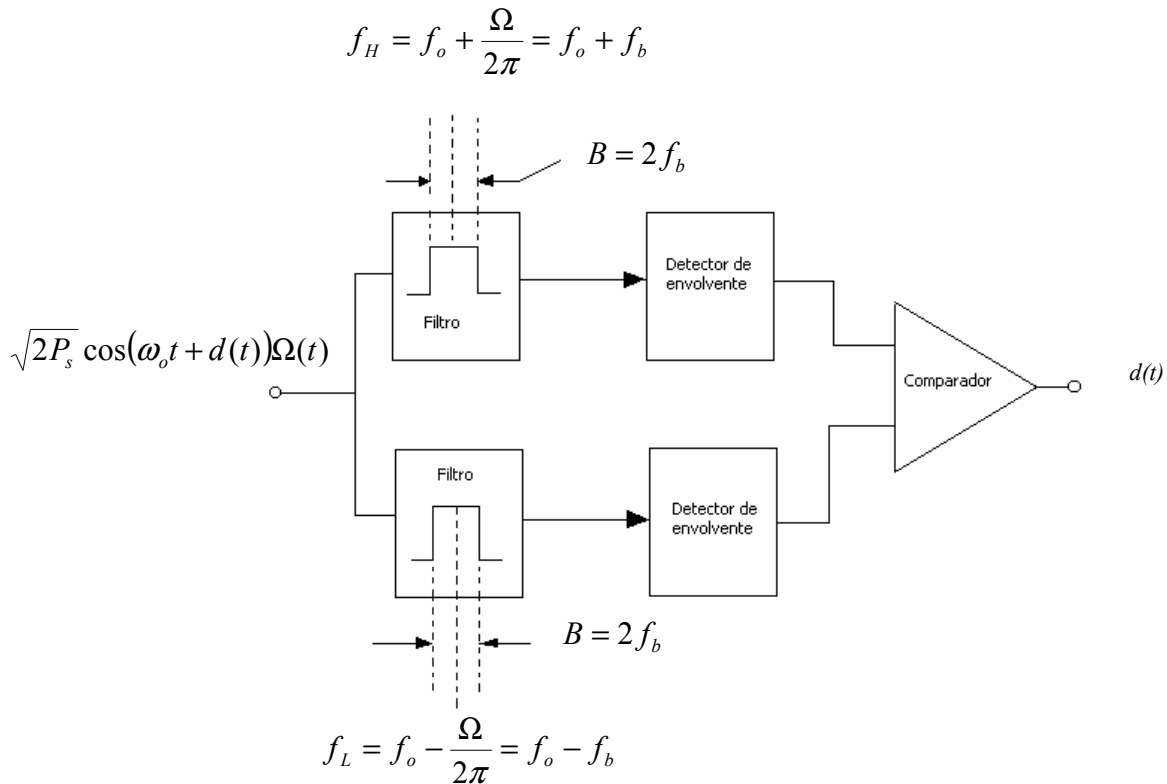
$d(t)$	$p_H(t)$	$p_L(t)$
+ 1V	+ 1V	0 V
- 1V	0 V	+ 1V

FUENTE: Herber Taub, Donald Schilling. **Principles of Communication Systems**. Pág. 276

Cuando $d(t)$ cambia de + 1 a -1 p_H cambia de 1 a 0 y p_L de 0 a 1. En cualquier instante p_H o p_L es 1 pero no ambos, y la señal generada tiene cualquier frecuencia angular, ya sea ω_H o ω_L .

Una señal es típicamente demodulada por el sistema de recepción que se muestra en la figura 23.

Figura 23. Receptor de BFSK



FUENTE: Herber Taub, Donald Schilling. **Principles of Communication Systems**. Pág. 278

La señal es aplicada a dos filtros pasabanda, uno con frecuencia centrada en f_H y el otro en f_L . Se asume que $f_H - f_L = 2(\Omega/2\pi) = 2f_b$. Los rangos de frecuencia de los filtros son seleccionados para que no exista un solapamiento, y cada filtro tiene un ancho pasabanda demasiado cercano al lóbulo principal del espectro de la señal BFSK.

Uno de los filtros pasa cerca de toda la energía de transmisión de f_H y el otro lo ejecuta similarmente para la transmisión de f_L . Las salidas de los filtros son aplicadas a detectores de envolvente y, finalmente, las salidas de los detectores son comparadas por un comparador. El comparador es un circuito que acepta dos señales. Éste genera una

salida binaria la cual es de un nivel o del otro según cual entrada sea mayor. Así la salida del comparador reproducirá los datos $d(t)$.

Cuando hay ruido presente, la salida del comparador podría ser muy debida a la respuesta del sistema en señal y ruido. En la práctica los sistemas usan un bit de sincronía y un integrador y muestrean la salida del comparador solo una vez al final de cada intervalo de tiempo T_b .

1.2.9. Módems

Un módem es un dispositivo que recibe información digital, en forma de unos y ceros, de la *CPU*. El módem analiza esta información convirtiéndola en signos analógicos que pueden enviarse por encima de una línea telefónica. Recibe dicha información otro módem, hace el proceso contrario al módem que le envía esta información, es decir, convierte la información en datos digitales, y envía los datos a la *CPU* receptora. El módem simboliza un modulador/demodulador.

El propósito principal del módem de datos es la interface del equipo de terminal digital a un canal de comunicación analógica. El módem de datos también se llama *DCE*, *conjunto de datos*, *teléfono de datos*, o simplemente un *módem*.

Los módems se clasifican generalmente como asíncronos o síncronos y utilizan modulación *FSK*, *PSK* o *QAM*. Con los módems síncronos la información de sincronización se recuperará en el módem de recepción. Los módems asíncronos utilizan modulación *FSK* y son restringidos a aplicaciones de baja velocidad (menor de 2000 bps). Los módems síncronos utilizan la modulación *PSK* o *QAM* y se usan para las aplicaciones de mediana velocidad (2400 a 4800 bps) y alta velocidad (9600 bps).

1.2.9.1. Módems asíncronos

Los módems asíncronos son usados principalmente para los circuitos de marcación de baja velocidad. Hay varios diseños de módem estándares comúnmente usados para la transmisión de datos asíncronos. El modem 202T es un transceptor asíncrono que utiliza modulación por desplazamiento de frecuencia. Utiliza una portadora de 1700 Hz que puede desplazarse a una tasa máxima de 1200 veces por segundo. Cuando aplica un 1 lógico (marca) al modulador, la portadora se desplaza descendentemente de 500 Hz, a 200 Hz. Cuando aplica un 0 lógico (espacio) la portadora desplaza ascendentemente de 500 Hz, a 2200 Hz. Consecuentemente, conforme la señal de entrada de datos alterna entre 1 y 0, la portadora se desplaza entre 1200 y 2200 Hz, respectivamente. Este proceso puede relacionarse a la modulación de frecuencia convencional. La diferencia entre las frecuencias de marca y espacio (1200 a 2200 Hz) es la desviación de frecuencia pico a pico y la velocidad de cambio de la señal de entrada digital (tasa de bit) es igual al doble de la frecuencia de la señal modulante. Por lo tanto, para el peor de los casos, la portadora de 1700 Hz se modula a la frecuencia por una onda cuadrada de 1200 Hz.

1.2.9.2. Módems síncronos

Los módems síncronos se usan para la transmisión de datos de velocidad mediana y alta y utilizan modulación *PSK* o *QAM*. Con los módems síncronos que transmiten reloj, junto con los datos, modulan de manera digital una portadora analógica. La portadora modulada se transmite al módem de recepción, en donde una portadora coherente se recupera y se usa para demodular los datos. El reloj de transmisión se recupera de los datos y se usa para sincronizar los datos recibidos en el DTE.

La modulación de *PSK* se usa para los módems síncronos de velocidad mediana (2400 a 4800 bps). Más específicamente *QPSK* se usa con módems de 2400 bps y *8-PSK* se usa con módems de 4800 bps. El *QPSK* tiene una eficiencia de ancho de banda de 2

bps/Hz; por lo tanto, la velocidad en baudios y un ancho de banda mínimo para un módem síncrono de 2400 bps, son 1200 baudios y 1200 Hz.

1.3. Modelos de red de datos

Los modelos de red de datos pueden ser: modelo *OSI* y modelo *TCP/IP*.

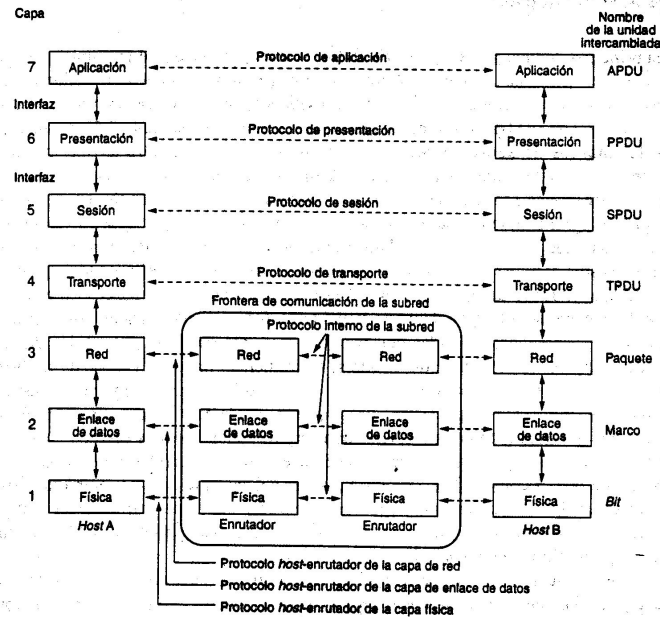
1.3.1. Modelo *OSI*

El modelo *OSI* tiene siete capas. Los principios que se aplicaron para llegar a las siete capas son los siguientes:

1. Se debe crear una capa siempre que se necesite un nivel diferente de abstracción.
2. Cada capa debe realizar una función bien definida.
3. La función de cada capa se debe elegir pensando en la definición de protocolos estandarizados internacionalmente.
4. Los límites de las capas deben elegirse a modo de minimizar el flujo de información a través de las interfaces.
5. La cantidad de capas debe ser suficiente para no tener que agrupar funciones distintas en la misma capa y lo bastante pequeña para que la arquitectura no se vuelva inmanejable.

En la figura 24 se muestra el modelo *OSI* (menos el medio físico).

Figura 24. El modelo OSI



FUENTE: Andrew S. Tanenbaum. **Redes de computadoras**. Pág. 29

La capa física. Tiene que ver con la transmisión de bits por un canal de comunicación. Las consideraciones de diseño tienen que ver con la acción de asegurarse de que cuando un lado envíe un bit 1, se reciba en el otro lado como tal y no como bit 0.

La capa de enlace de datos. La tarea principal es tomar un medio de transmisión en bruto y transformarlo en una línea que parezca libre de errores de transmisión no detectados a la capa de red. Esta tarea la cumple al hacer que el emisor divida los datos de entrada en **marcos de datos**, que transmita los marcos en forma secuencial y procese los **marcos de acuse de recibo** que devuelve el receptor.

Otra consideración que surge en la capa de enlace de datos es cómo evitar que un transmisor veloz saturar de datos a un receptor lento. Se debe emplear algún mecanismo de regulación de tráfico para que el transmisor sepa cuánto espacio de almacenamiento temporal (*buffer*) tiene el receptor en ese momento.

La capa de red. Se ocupa de controlar el funcionamiento de la subred. Una consideración clave de diseño es determinar cómo se encaminan los paquetes de la fuente a su destino. Cuando un paquete debe viajar de una red a otra para alcanzar su destino, pueden surgir muchos problemas. El tipo de direcciones que usa la segunda red puede ser diferente del de la primera; puede ser que la segunda no acepte en absoluto el paquete por ser demasiado grande; los protocolos pueden diferir y otras cosas. La capa de red debe resolver todos estos problemas para lograr que se interconecten redes heterogéneas.

La capa de transporte. Su función básica es aceptar datos de la capa de sesión, dividirlos en unidades más pequeñas, si es necesario, pasarlos a la capa de red y asegurar que todos los pedazos lleguen correctamente al otro extremo. En condiciones normales, la capa de transporte crea una conexión de red distinta para cada conexión de transporte que requiera la capa de sesión. Sin embargo, si la conexión de transporte requiere un volumen de transmisión alto, la capa de transporte podría crear múltiples conexiones de red, dividiendo los datos entre las conexiones para aumentar el volumen.

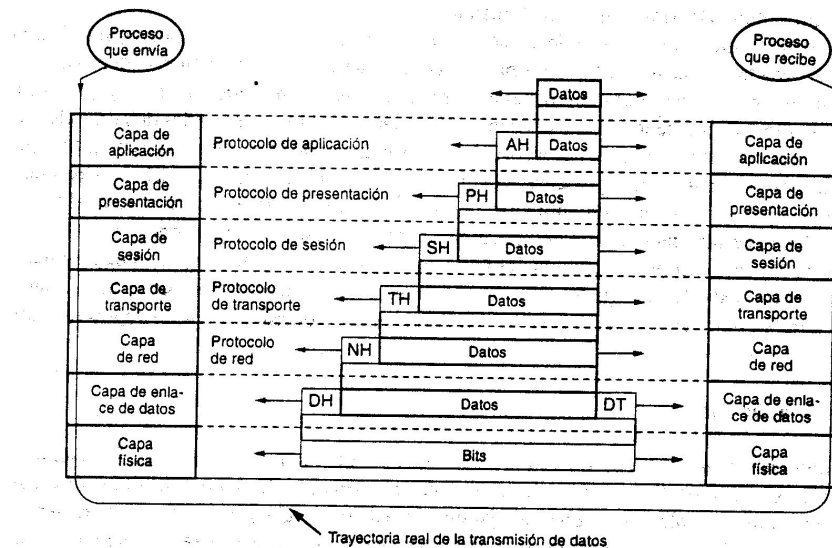
La capa de sesión. Permite a los usuarios de máquinas diferentes establecer sesiones entre ellos. Una sesión permite el transporte ordinario de datos, como lo hace la capa de transporte, pero también proporciona servicios mejorados que son útiles en algunas aplicaciones.

La capa de presentación. Realiza ciertas funciones que se piden con suficiente frecuencia para justificar la búsqueda de una solución general, en lugar de dejar que cada usuario resuelva los problemas. La capa de presentación se ocupa de la sintaxis y la semántica de la información que se transmite. Un ejemplo típico es la codificación de datos en una forma estándar acordada.

La capa de aplicación. Contiene varios protocolos que se necesitan con frecuencia. Por ejemplo, existen cientos de tipos de terminales incompatibles en el mundo. Que es una aplicación en la transferencia de archivos entre dos sistemas diferentes, y que dicha capa resuelva ésta y otras incompatibilidades.

En la figura 25 se muestra un ejemplo de cómo se pueden transmitir datos empleando el modelo *OSI*.

Figura 25. Ejemplo de uso del modelo *OSI*. Algunos de los encabezados pueden ser nulos



FUENTE: Andrew S. Tanenbaum. **Redes de computadoras**. Pág. 34

El proceso remitente tiene algunos datos que quiere enviar al proceso receptor, así que entrega los datos a la capa de aplicación, la cual añade al principio el encabezado de aplicación *AH* (que puede ser nulo) y entrega el elemento resultante a la capa de presentación.

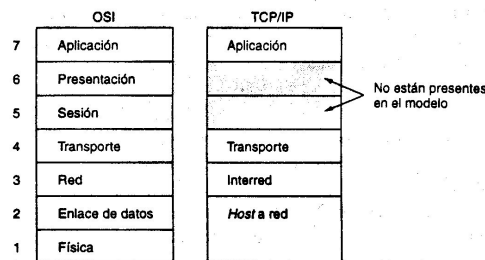
La capa de presentación puede transformar este elemento de diferentes maneras y, posiblemente, añadir al principio un encabezado, entregando el resultado a la capa de

sesión. Es importante darse cuenta que la capa de presentación no sabe cuál porción de los datos entregados a ella por la capa de aplicación es *AH*, si existe, y cuáles son en verdad los datos del usuario. Este proceso se repite hasta que los datos alcanzan la capa física, donde son transmitidos realmente a la máquina receptora.

1.3.2. Modelo *TCP/IP*

TCP/IP es el modelo que se usa en la *ARPANET*. En la figura 26 se muestra la correspondencia del modelo *TCP/IP* con el modelo *OSI*.

Figura 26. El modelo de referencia *TCP/IP*



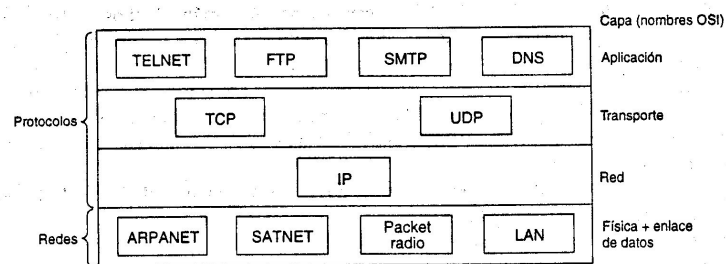
FUENTE: Andrew S. Tanenbaum. **Redes de computadoras**. Pág. 36

La capa de interred. La misión de esta capa es permitir que los nodos inyecten paquetes en cualquier red y los hagan viajar de forma independiente a su destino (que podría estar en una red diferente). Los paquetes pueden llegar, incluso, en un orden diferente a aquel en que se enviaron, en cuyo caso corresponde a las capas superiores reacomodarlos, si se desea la entrega ordenada. Define un formato de paquete y protocolo oficial llamado *IP* (*Internet protocol*, **protocolo de interred**) el trabajo de la capa de interred es entregar paquetes *IP* a donde se supone que deben ir.

La capa de transporte. Esta capa se diseñó para permitir que las entidades pares en los nodos de origen y destino lleven a cabo una conversación, lo mismo que en la

capa de transporte *OSI*. Se definieron dos protocolos de extremo a extremo, el primero, **TCP** (*transmission control protocol*, **protocolo de control de la transmisión**). Este protocolo fragmenta la corriente entrante de *bytes* en mensajes discretos y pasa cada uno a la capa de interred. También se encarga del control de flujo para asegurar que un emisor rápido no pueda abrumar a un receptor lento. El segundo protocolo de esta capa **UDP** (*user datagram protocol*, **protocolo de datagrama de usuario**) es un protocolo sin conexión, no confiable, para aplicaciones que no necesitan la asignación de secuencia ni el control de flujo del *TCP*; se usa ampliamente para consulta de petición y respuesta de una sola ocasión. En la figura 27 se muestra la relación entre *IP*, *TCP* y *UDP*.

Figura 27. Protocolos y redes en el modelo TCP/IP inicial



FUENTE: Andrew S. Tanenbaum. **Redes de computadoras**. Pág. 37

La capa de aplicación. Contiene todos los protocolos de alto nivel. Entre los protocolos más antiguos están el de terminal virtual (*TELNET*), el de transferencia de archivos (*FTP*) y el de correo electrónico (*SMTP*). El protocolo de terminal virtual permite que un usuario en una máquina ingrese en una máquina distante y trabaje ahí. El protocolo de transferencia de archivos ofrece un mecanismo para mover datos de una máquina a otra en forma eficiente.

2. REDES CELULARES

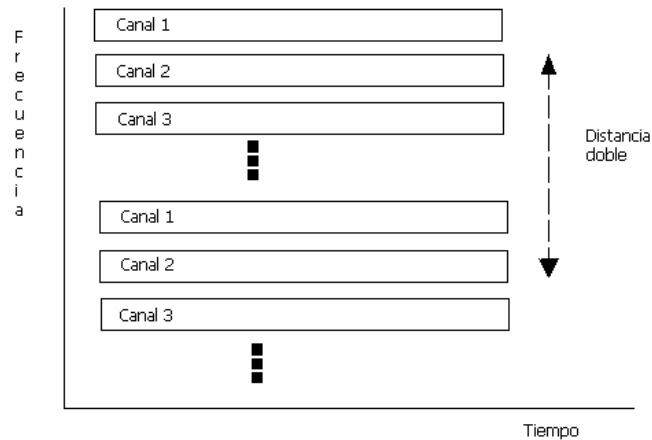
2.1. Tecnologías de transmisión de voz y datos en redes celulares

Acceso múltiple por división de frecuencia (*FDMA*)

De las técnicas de acceso múltiple más comunes usadas en los sistemas de comunicación móvil, *FDMA* es la más simple. Con *FDMA*, el espectro disponible es dividido en un número de canales de radio de un ancho de banda especificado, y una selección de estos canales es usada dentro de una celda dada.

En la mayoría de sistemas *FDMA*, canales separados son usados en cada dirección, de la red al usuario (transmisión) y del usuario a la red (recepción). Esto es un acercamiento a la conocida doble división de frecuencia *FDD* (de sus siglas en inglés *Frequency Division Duplex*) y, normalmente, es una separación fija que existe entre la frecuencia usada en la recepción y la usada en la transmisión. Esta separación fija es conocida como la distancia doble. Una técnica *FDD FDMA* puede ser representada tal como se muestra en la figura 28.

Figura 28. Acceso FDMA



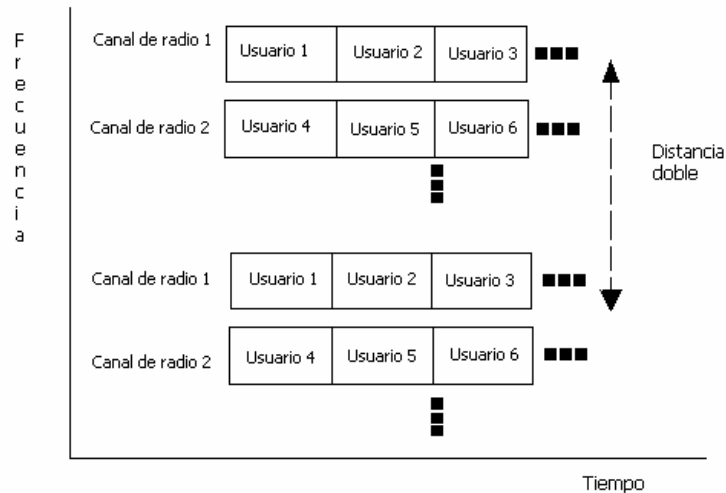
FUENTE: Clint Smith. P.E., Daniel Collins. **3G Wireless Networks**. Pág. 17

FDD no es el único esquema doble. Otra técnica conocida como doble división de tiempo es también usada *TDD* (*time division duplex*). En tal sistema solamente un canal es usado para transmisión y recepción. Con *TDD*, el canal es usado muy brevemente para la recepción, y también muy brevemente para la transmisión, y así sucesivamente.

Acceso múltiple por división del tiempo (*TDMA*)

Con el acceso múltiple por división de tiempo (*TDMA*), los canales de radio son divididos en un número de *slots* de tiempo, con cada usuario asignado a un *slot* de tiempo dado. Por ejemplo, en una frecuencia de radio dada, el usuario A podría ser asignado al *slot* de tiempo número 1 y el usuario B podría ser asignado al *slot* de tiempo número 3. La asignación es realizada por la red como parte del procedimiento del establecimiento de la llamada. Así, el dispositivo de los usuarios sabe exactamente cual *slot* de tiempo usa para el resto de la llamada, y el dispositivo de tiempo hace que las transmisiones correspondan exactamente con el *slot* de tiempo asignado. El esquema de esta técnica se muestra en la figura 29.

Figura 29. Acceso TDMA



FUENTE: Clint Smith. P.E., Daniel Collins. **3G Wireless Networks**. Pág. 17

Típicamente un sistema *TDMA* es también un sistema *FDD*, aunque *TDD* es usada en algunas implementaciones. Además, los sistemas *TDMA* normalmente usan *FDMA*. Así, el ancho de banda disponible es dividido en un número de canales pequeños como en *FDMA* y estos canales son divididos en *slots* de tiempo. La diferencia entre un sistema puro *FDMA* y un sistema *TDMA* que también usa *FDMA* es que, con el sistema *TDMA*, un usuario dado no tiene acceso exclusivo a el canal de radio.

La implementación de un sistema *TDMA* puede ser hecha a través de diferentes caminos. Por ejemplo, diferentes sistemas *TDMA* podrían tener diferentes números de *slots* de tiempo por canal de radio y/o diferentes duraciones de *slot* de tiempo, y/o diferentes anchos de banda de canal de radio.

2.1.1. *CDMA*

Descripción del acceso *CDMA*

De sus siglas en inglés *CDMA* (*code división múltiple acces*) significa **acceso múltiple por división de código**. El *CDMA* permite que cada estación transmita en el espectro completo de frecuencia. Su funcionamiento clave se basa en ser capaz de extraer la señal deseada mientras se rechaza todo lo demás como ruido.

En *CDMA*, cada tiempo de bit se subdivide en m intervalos llamados **chips**. Comúnmente hay 54 o 128 chips por bit. A cada estación se asigna un código único de m bits, o **secuencia de chips**. Para transmitir un bit 1, una estación envía su secuencia de chips; para transmitir un bit 0, envía el complemento a 1 de su secuencia de chips. No se permite otros patrones. Por tanto, para $m = 8$, si la estación A tiene asignada la secuencia de chips 00011011, envía un bit 1 transmitiendo 00011011, y un bit 0 enviando 11100100.

El aumento en la cantidad de información enviada de b bits/seg a mb chips/seg sólo puede lograrse si el ancho de banda disponible se incrementa por un factor de m , así se hace de *CDMA* una forma de comunicación de espectro amplio (suponiendo que no hay cambios en la técnica de modulación ni de codificación). Si se tiene una banda de 1 MHz disponible para 100 estaciones, con *FDMA* cada una tendría 10 kHz y podría enviar a 10 kbps (suponiendo 1 bit por Hz). Con *CDMA*, cada estación usa la totalidad de 1 MHz, por lo que la razón de chips es de 1 megachip por segundo. Con menos de 100 chips por bit, el ancho de banda efectivo por estación es mayor para *CDMA*, que para *FDMA* y se resuelve también el problema de reparto del canal.

Al utilizar los niveles de voltaje de + 1 V para el 1 binario y -1 para el cero binario, entonces para la estación A la secuencia de bits se convierte en (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1). En la figura 30 se muestran las secuencias de chips binarios asignadas a cuatro estaciones de ejemplo.

Figura 30. a) Secuencias de chips binarios para cuatro estaciones b) Secuencias de chips bipolares

A: 00011011	A: (-1-1-1+1+1-1+1+1)
B: 00101110	B: (-1-1+1-1+1+1+1-1)
C: 01011100	C: (-1+1-1+1+1+1-1-1)
D: 01000010	D: (-1+1-1-1-1-1+1-1)
(a)	(b)

FUENTE: Andrew S. Tanenbaum. **Redes de computadoras**. Pág. 273

Cada estación tiene su propia secuencia de chip única. Se utiliza el símbolo \mathcal{S} para indicar el vector m de los chips para la estación S y $\overline{\mathcal{S}}$ para su negación. Todas las secuencias de chips son **ortogonales** en pares, con lo que el producto escalar normalizado de dos secuencias de chips distintas, \mathcal{S} y \mathcal{T} (que se escribe como $\mathcal{S} \bullet \mathcal{T}$) es 0. En términos matemáticos:

$$\mathcal{S} \bullet \mathcal{T} \equiv \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0 \quad (2.1)$$

El producto escalar normalizado de cualquier secuencia de chips con ella misma es 1

$$\mathcal{S} \bullet \mathcal{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i S_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\pm 1)^2 = 1 \quad (2.2)$$

Esto ocurre porque cada uno de los m términos del producto escalar es 1, por lo que la suma es m . También se tiene que: $\mathcal{S} \bullet \overline{\mathcal{S}} = -1$.

Durante cada tiempo de bit, una estación puede transmitir un 1 enviando su secuencia de chips, puede transmitir un 0 enviando el negativo de su secuencia de chips o puede permanecer en silencio y no transmitir nada. Cuando dos o más estaciones transmiten simultáneamente, sus señales bipolares se suman linealmente.

En la figura 31 se muestran seis ejemplos de estaciones que transmiten al mismo tiempo.

Figura 31. Ejemplos de transmisión de chips

-- 1 - C	$S_1 = (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)$
- 1 1 - B + C	$S_2 = (-2 0 0 0 +2 +2 0 -2)$
1 0 -- A + \bar{B}	$S_3 = (0 0 -2 +2 0 -2 0 +2)$
1 0 1 - A + \bar{B} + C	$S_4 = (-1 +1 -3 +3 -1 -1 -1 +1)$
1 1 1 1 A + B + C + D	$S_5 = (-4 0 -2 0 +2 0 +2 -2)$
1 1 0 1 A + B + \bar{C} + D	$S_6 = (-2 -2 0 -2 0 -2 +4 0)$

FUENTE: Andrew S. Tanenbaum. **Redes de computadoras**. Pág. 273

En el primero, *C* transmite un bit 1, por lo que sólo se obtiene la secuencia de chips de *C*. En el segundo, tanto *B* como *C* transmiten bits 1, por lo que se obtiene la suma de sus secuencias bipolares de chips, es decir:

$$(-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1) + (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1) = (-2 0 0 +2 +2 0 -2)$$

En el tercero, la estación *A* envía un 1 y la estación *B* envía un 0. Las otras están en silencio. En el cuarto, *A* y *C* envían un bit 1 mientras *B* envía un bit 0. En el quinto, las cuatro estaciones envían un bit 1. Finalmente, en el último, *A*, *B* y *D* envían un bit 1, mientras que *C* envía un bit 0.

Para recuperar la cadena de bits de una estación individual, el receptor debe conocer las secuencias de chips de esta estación por adelantado. El receptor hace la

recuperación calculando el producto escalar normalizado de la secuencia de *chips* recibida (la suma lineal de todas las estaciones que transmitieron) y la secuencia de chips de la estación cuya corriente de bits trata de recuperar. Si la secuencia de chips recibida es \vec{S} y el receptor trata de escuchar una estación cuya secuencia de chips es \vec{C} , simplemente, calcula el producto escalar normalizado, $\vec{S} \bullet \vec{C}$.

Ahora se considerará el siguiente ejemplo que se muestra en la figura 32, basado en la recuperación del bit enviado por la estación *C*.

Figura 32. Recuperación de una señal CDMA transmitida por una estación

$$\begin{aligned}
 S_1 \bullet C &= (+1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1)/8 = 1 \\
 S_2 \bullet C &= (2 +0 +0 +0 +2 +2 +0 +2)/8 = 1 \\
 S_3 \bullet C &= (0 +0 +2 +2 +0 -2 +0 -2)/8 = 0 \\
 S_4 \bullet C &= (1 +1 +3 +3 +1 -1 +1 -1)/8 = 1 \\
 S_5 \bullet C &= (4 +0 +2 +0 +2 +0 -2 +2)/8 = 1 \\
 S_6 \bullet C &= (2 -2 +0 -2 +0 -2 -4 +0)/8 = -1
 \end{aligned}$$

FUENTE: Andrew S. Tanenbaum. **Redes de computadoras**. Pág. 273

Al suponer que el receptor está interesado en extraer el bit enviado por la estación *C* de cada una de las seis sumas S_1 a S_6 , el receptor calcula el bit sumando los productos en pares del \vec{S} recibido y el vector \vec{C} , y divide luego el resultado entre 8 (dado que $m = 8$).

2.1.1.1. Descripción del sistema IS-95

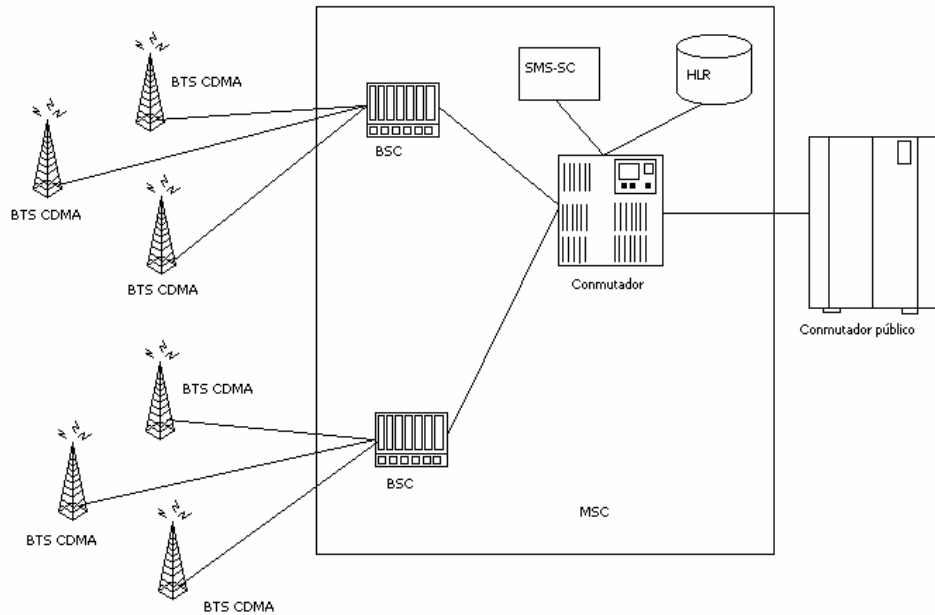
La multiplexación por división de código (*CDMA*), también conocida como *IS-95* y *J-STD-008*, es la plataforma de la tecnología de espectro expandido, que habilita a que múltiples usuarios ocupen el mismo canal de radio, o espectro de frecuencia, al mismo tiempo. *CDMA* tiene y está siendo utilizado para comunicación punto a punto para

microonda y para comunicación satélital, como también para la militar. Con *CDMA*, cada uno de los suscriptores o usuarios, utiliza un único código que los diferencia de otros usuarios. *CDMA* ofrece muchas características únicas, incluso, la capacidad de eliminar la interferencia y mejorar la inmunidad a las multifases debidas al ancho de banda.

IS-95 tiene dos versiones distintas, *IS-95A* e *IS-95B*, además de la *J-STD-008*. La *J-STD-008* es compatible con ambas, con excepción de la banda de frecuencia de operación. *IS-95 B* es un paso intermedio entre 2G y 3G.

CDMA está basado principalmente en la técnica de “secuencia directa” (*direct sequense DS*) y es una tecnología de espectro expandido en banda ancha. El canal *CDMA* es reutilizado en todas las celdas del sistema y es diferenciado por los códigos pseudoaleatorios (*PN*) que éste utiliza. El diagrama que se muestra en la figura 33 es una versión simplificada de arquitectura de la *IS-95A/B*.

Figura 33. Arquitectura del sistema *IS-95A/B* simplificado



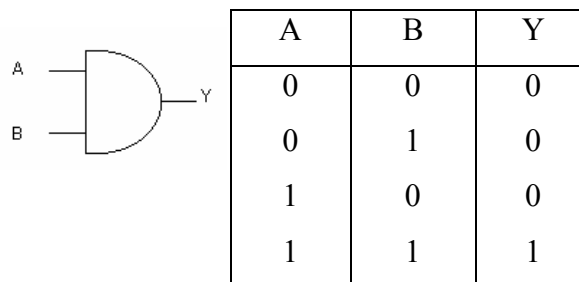
FUENTE: Clint Smith, P. E., Daniel Collins. **3G Wireless Networks**. Pág 92

2.1.1.2. Códigos básicos (*AND*, *XOR*)

Función *AND*

En la figura 34 se muestra una compuerta *AND* con su correspondiente tabla de verdad.

Figura 34. Función *AND*



FUENTE: **Qualcomm cdma University**. Pág 3-4

A y B denotan las entradas de la compuerta, mientras que Y denota la salida. La operación AND (o función) está definida por la siguiente ecuación:

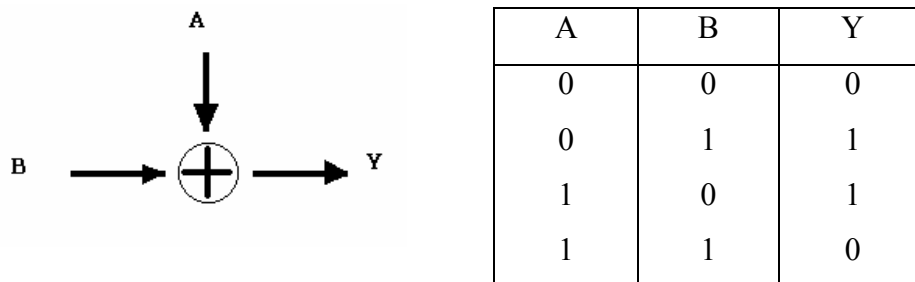
$$Y = A \bullet B \quad (2.3)$$

la salida de la compuerta AND es igual a “1” lógico si ambas entradas A y B son “1” lógico. La salida de la compuerta AND es cero si cualquiera de las entradas asume el estado de “0” lógico.

Función XOR

En la figura 35 se muestra una compuerta XOR con su correspondiente tabla de verdad.

Figura 35. Función XOR



FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 3-4

A y B denotan las entradas, mientras que Y denota la salida. La operación XOR (o función) está simplemente definida por la ecuación:

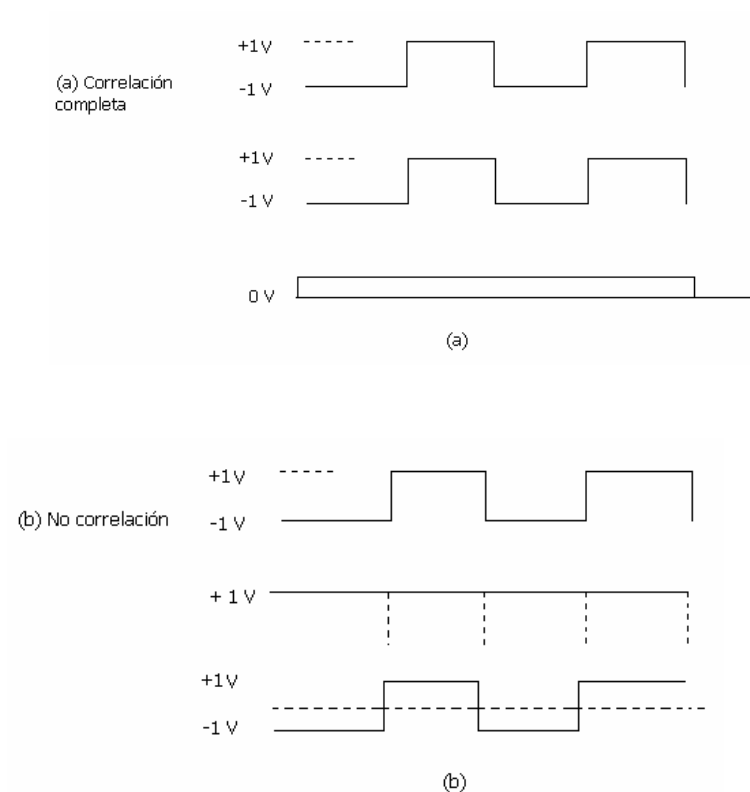
$$Y = A \oplus B = \bar{A} \bullet B + A \bullet \bar{B} \quad (2.4)$$

La compuerta *XOR* produce un uno cuando las dos entradas tienen niveles opuestos. Cuando el número total de unos en las entradas es impar, el resultado de la operación *XOR* es “1”.

Correlación

Correlación es una medida de la similitud entre cualquiera de dos señales arbitrarias. Se obtiene por la multiplicación de las dos señales e integrando el resultado sobre una ventana de tiempo definida. En la figura 36 se muestra un ejemplo de correlación y no correlación entre dos señales.

Figura 36. a) Correlación entre dos señales iguales b) Correlación entre dos señales distintas



- Figura (a). Las dos señales son idénticas y, por lo tanto, su correlación es 1 ó 100 %.
- Figura (b). Las dos señales no tienen correlación y, por lo tanto, una de ellas no proporciona ninguna información sobre la otra.

2.1.1.3. Secuencias ortogonales

Son códigos empleados para transmitir y recibir mensajes en *CDMA2000*.

2.1.1.3.1. Funciones ortogonales

Una función ortogonal (que es, una señal o una secuencia), tiene correlación de cruce de cero. La correlación cero es obtenida si el producto de dos señales, integradas sobre un período de tiempo, es cero.

Para el caso especial de las secuencia binarias, los valores 0 y 1 podrían ser vistos como polaridades opuestas. Así cuando el producto (operación *XOR* en este caso) de dos secuencias binarias resulta en un número igual de “1” y “0”, el cruce de correlación es cero.

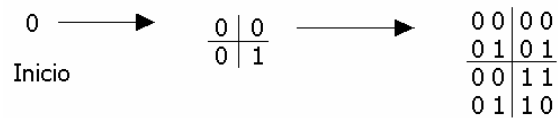
Las funciones ortogonales tienen correlación cero. Dos secuencias binarias son ortogonales si la operación “*XOR*” de ellas resulta en un número igual de “1” y “0”. Por ejemplo:

$$\begin{array}{r} 0000 \\ \underline{0101} \\ 0101 \end{array}$$

2.1.1.3.2. Generación de códigos ortogonales

Los códigos ortogonales son fáciles de generar, empiezan como punto inicial con un cero binario, repiten el 0 horizontalmente y verticalmente, y complementan el 0 diagonalmente. Este proceso es continuado con el nuevo bloque generado hasta que son generados los códigos deseados con la longitud apropiada. Las secuencias creadas de esta manera están referidas al código *Walsh*. En la figura 37 se muestra el proceso de generación de códigos *Walsh*.

Figura 37. Generación de códigos ortogonales



- Repetir
 - Derecha
 - Debajo
- Invertir (diagonalmente)

FUENTE: **Qualcomm cdma University**. Pág 3-8

Las secuencias ortogonales actuales usadas en sistemas terrestres *CDMA2000* son códigos *Walsh* de longitud 64.

- En el *CDMA* directo, los códigos *Walsh* son usados para separar usuarios. En cualquier sector dado, cada canal directo es asignado a un distinto código *Walsh*.
- En el *CDMA* reverso, las 64 secuencias *Walsh* son usadas como una señalización por el modulador ortogonal banda/base.

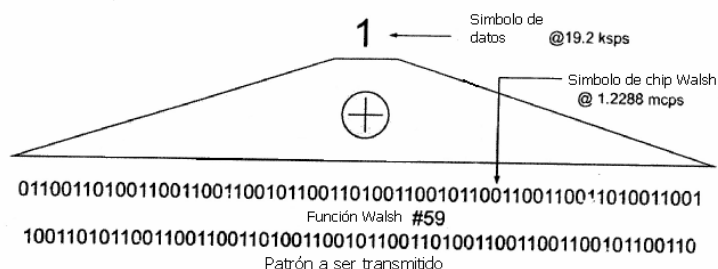
En la figura 38 se muestran los códigos *Walsh* de longitud 64.

2.1.1.3.3. Expansiones ortogonales

El principio de expandir y luego contraer, es aquel cuando un símbolo es operado en función *XOR* con un patrón conocido y el resultado es de nuevo operado con la función *XOR* con el mismo patrón, recobrando el símbolo original. En otras palabras, el efecto de una operación *XOR*, si dicha función es realizada dos veces usando el mismo código, es nulo.

En expansión ortogonal, cada símbolo es codificado con la función *XOR* con todos los 64 chips del código *Walsh*. En la figura 39 se muestra un símbolo de valor igual a “1” el cual es expandido ortogonalmente con el código *Walsh* #59, lo que produce una representación 64-chip del símbolo.

Figura 39. Expansión ortogonal



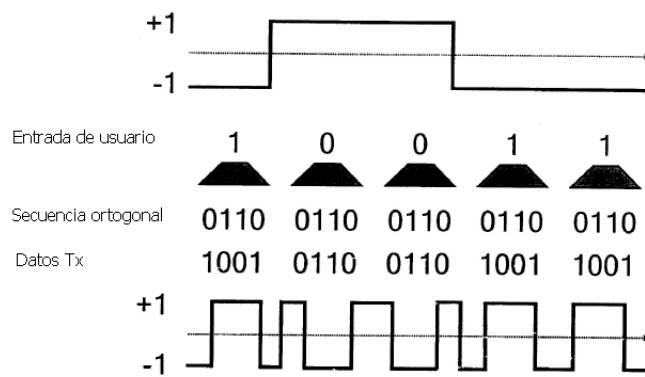
FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 3-10

2.1.1.3.4. Ejemplo de canalización usando expansión ortogonal

En la expansión, cada símbolo es operado en función *XOR* con todos los chips con la secuencia ortogonal (secuencia *Walsh*) asignada a el usuario. El resultado de la secuencia es procesado y transmitido a lo largo del canal físico con los otros símbolos extendidos.

En la figura 40 se muestra un ejemplo, cuatro dígitos de código son usados. El producto de los símbolos de los usuarios y los códigos extendidos es una secuencia de los dígitos que deben ser transmitidos en los cuatro tiempos de la tasa original de la señal binaria codificada.

Figura 40. Canalización usando expansión ortogonal



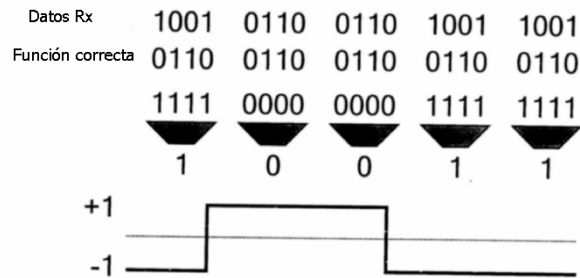
FUENTE: **Qualcomm cdma University**. Pág 3-11

2.1.1.3.5. Recuperación de símbolos expandidos

El receptor comprime los chips extendidos usando el mismo código *Walsh* que fue usado para transmitirlos. En las condiciones sin ruido, los símbolos o dígitos son completamente recuperados sin ningún error. En la realidad, el canal no es libre de ruido, pero los sistemas *CDMA2000* emplean, un algoritmo de corrección de errores denominado *FEC* (*forward error correction*, corrección de errores de transmisión).

En la figura 41 se muestra un ejemplo de la recuperación de los símbolos expandidos.

Figura 41. Recuperación de símbolos expandidos



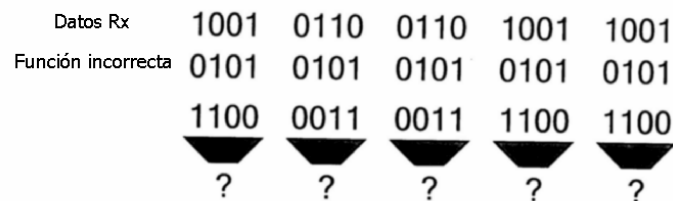
FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 3-12

2.1.1.3.6. Recuperación de símbolos expandidos usando una función errónea

Quando una secuencia errónea *Walsh* es utilizada para comprimir los símbolos extendidos, el resultado de la correlación produce un promedio de cero. Esto demuestra claramente la ventaja de la propiedad de ortogonalidad de los códigos *Walsh*.

Si un código erróneo es equivocadamente usado por un usuario designado o por otros usuarios para decodificar la señal recibida, el resultado de la correlación es siempre cero debido a la propiedad de ortogonalidad de las secuencias *Walsh*. Tal como se muestra en la figura 42.

Figura 42. Recuperación usando una función errónea



FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 3-13

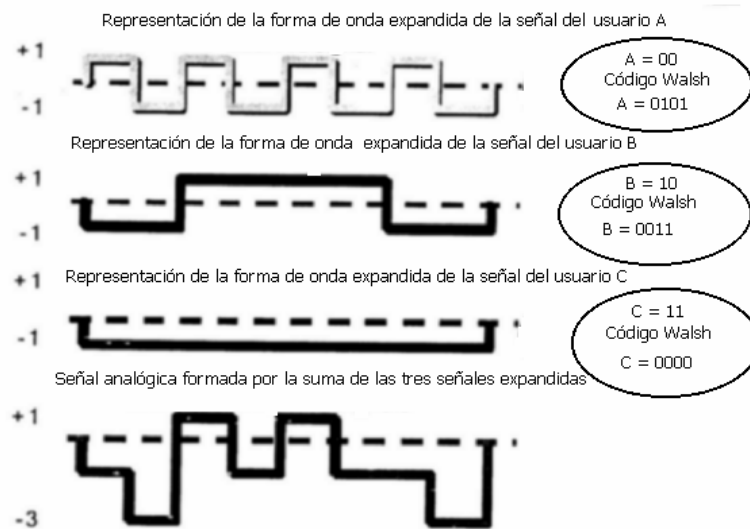
2.1.1.3.7. Un ejemplo del código de expansión con tres suscriptores

En este ejemplo, tres usuarios, A, B, y C les son asignados tres códigos ortogonales para propósitos de expansión:

- Usuario A señal = 00, código de expansión = 0101
- Usuario B señal = 10, código de expansión = 0011
- Usuario C señal = 11, código de expansión = 0000

En la figura 43 se muestra de manera gráfica las señales y la señal analógica formada por la suma de las tres señales expandidas.

Figura 43. Ejemplo de expansión con tres usuarios



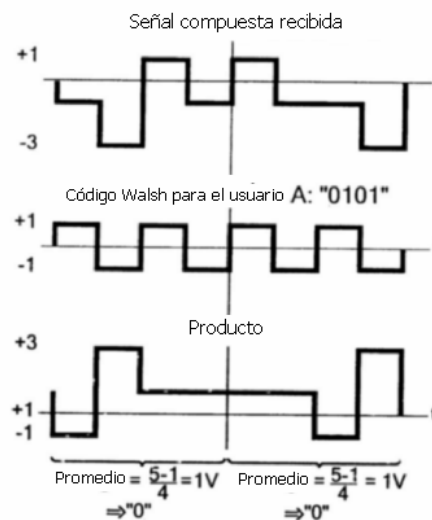
FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 3-14

La señal analógica que se muestra en la figura 43 es una señal compuesta de la suma de todos los símbolos expandidos.

2.1.1.3.8. Ejemplo de recuperación de un código extendido mediante la compresión

En el receptor del usuario A, la señal analógica compuesta es multiplicada por el código *Walsh* correspondiente al usuario A y el resultado es promediado sobre el intervalo del símbolo. Este proceso es llamado correlación. Se observa que el valor promedio del voltaje sobre el tiempo de un símbolo es igual a 1, por lo tanto, el bit original transmitido por A fue "0" tal como se muestra en la figura 44.

Figura 44. Ejemplo de compresión de un código expandido



FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 3-15

Se pueden decodificar los símbolos para los usuarios B y C de la misma manera. Este proceso ocurre en los móviles *CDMA* para recobrar las señales.

2.1.1.4. Códigos de ruido pseudoaleatorios (PN)

Son la máxima longitud de las secuencias binarias pseudoaleatorias, cuyo significado es el siguiente:

- **Pseudoaleatorio:** relacionado con los números aleatorios generados por un proceso determinístico.
- **Binario:** toma uno o dos valores.
- **Máxima longitud:** máximo período logrado de una secuencia generada; no arbitraria.

Las propiedades de estos códigos son las siguientes:

- **Propiedad de balance:** la secuencia de salida tendría un número casi igual de ceros y de unos (2^{r-1} unos y $2^{r-1} - 1$ ceros).
- **Propiedad de correr la longitud:** en cualquier período, la mitad de ceros consecutivos o unos son de longitud uno, un cuarto son de longitud dos, un octavo son de longitud tres, etc.
- **Propiedad de desplazamiento y suma:** la suma de chip por chip de la secuencia de salida C_k y de cualquier desplazamiento de ella misma C_{k+t} , $\tau \neq 0$ es la versión del tiempo de desplazamiento de la misma secuencia.
- **Propiedad de autocorrelación.**

2.1.1.4.1. Balance de códigos *PN*

La máxima longitud de los códigos *PN* es que tienen más unos que ceros. No todos los códigos *PN* tienen este comportamiento.

Este balance de unos y de ceros da a los códigos *PN* ventajas sobre la contaminación por ruido, lo cual es importante en *CDMA2000*.

2.1.1.4.2. Distribución de unos y ceros

Con la distribución de longitud corrida como se muestra en la tabla III, la densidad de potencia espectral de los códigos *PN* es plana con la frecuencia (o “blanca”), con los medios que cuando es usada para la expansión, la energía de la forma de onda expandida es uniformemente expandida a lo largo del ancho de banda de la señal.

Tabla III. Distribución de unos y ceros

Distribución de corridas para una secuencia *m* de $2^7 - 1$ bit

Número de corridas			
Longitud corrida (bits)	unos	ceros	Número de bits incluidos
1	16	16	32
2	8	8	32
3	4	4	24
4	2	2	16
5	1	1	10
6	0	1	6
7	1	0	7
			<hr style="width: 50%; margin: auto;"/> 127 total

El número de corridas de cada longitud decrementa la potencia en 2 así incrementa la longitud de la corrida.

2.1.1.4.3. Aislamiento de códigos

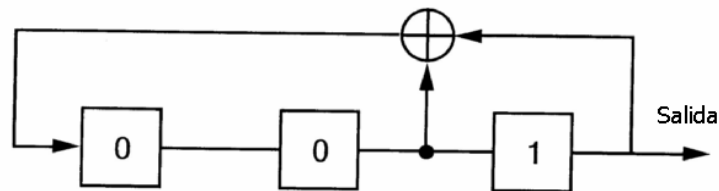
Los códigos *PN* cortos son usados como el paso final en la modulación del espectro expandido, y éste hace que el envío de cada sector sea una única forma de onda, puesto que todos los sectores tienen diferente código *PN* corto de desplazamiento. El total de todas las funciones *Walsh* es reutilizado en todos los sectores.

2.1.1.4.4. Generación de códigos *PN*

Los códigos *PN* son generados de polinomios principales usando la aritmética de modulo 2. Las máquinas de estado que generan estos códigos son muy simples y consisten de registros de desplazamiento y compuertas *XOR*.

En la figura 45 se muestra un esquema de generación de códigos *PN*.

Figura 45. Generación de códigos *PN*

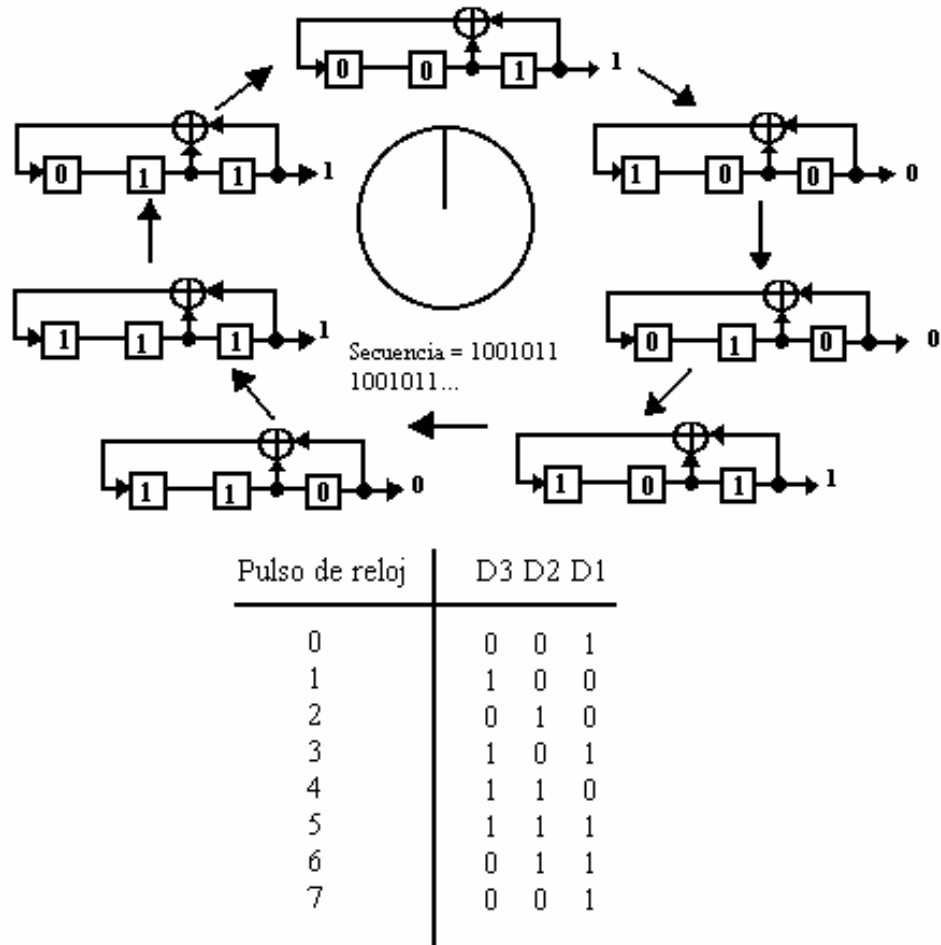


- Registro con valor inicial 001
- La salida será una secuencia de 7 dígitos que se repite continuamente: 1001011

FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 3-22

Los códigos *PN* son de máxima longitud. En general, si hay N registros de desplazamiento (N = número de registro de desplazamiento), la longitud del código *PN* es igual a $2^N - 1$. En la figura 46 se muestra un ejemplo, en el que el número de estados distintos en los registros de desplazamiento es $2^3 - 1 = 7$.

Figura 46. Estados de los registros de desplazamiento

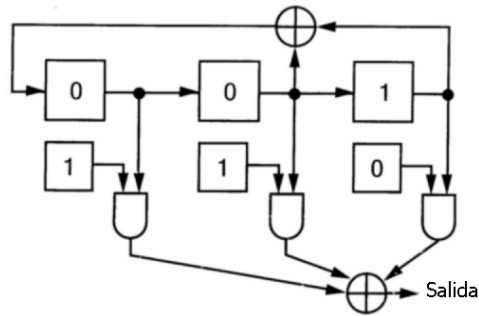


FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 3-23

2.1.1.4.5. Enmascaramiento de códigos PN

El enmascaramiento proporciona el desplazamiento en el tiempo de los códigos PN. Diferentes máscaras corresponden a diferentes tiempos de desplazamiento. En los sistemas CDMA2000, números electrónicos seriales (*electronic serial numbers, ESN*) son usados como máscaras para usuarios en canales de tráfico. En la figura 47 se muestra un esquema para enmascarar códigos PN.

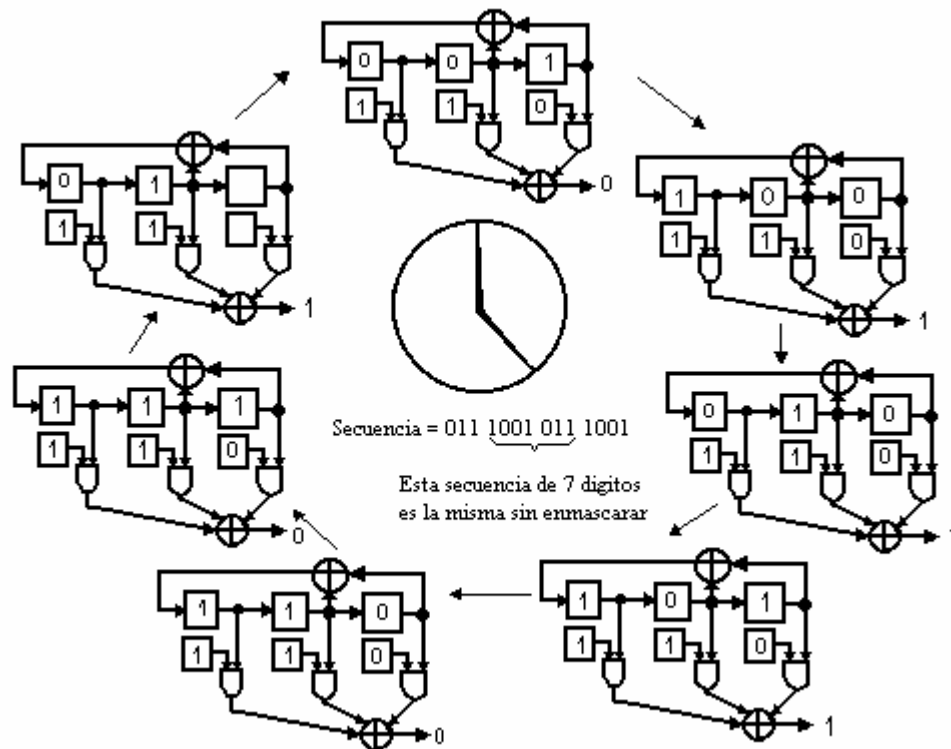
Figura 47. El enmascarado causa que el generador produzca la misma secuencia, pero desplazada en el tiempo



FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 3-24

En la figura 48 se muestra cómo una máscara produce la misma secuencia original desplazada en el tiempo.

Figura 48. Secuencia producida por un generador de máscara



FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 3-25

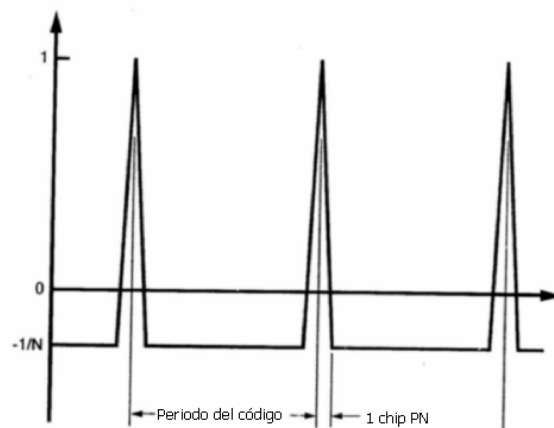
El contenido de la máscara de 3 dígitos determina el desplazamiento de la secuencia. El enmascarado es usado para producir desplazamientos en ambos códigos, tanto en los cortos como en los largos. Los desplazamientos de los códigos cortos son usados únicamente para identificar los canales de envío de sectores individuales o celdas. Los desplazamientos de códigos *PN* largos son usados para separar códigos de canal en dirección reversa.

2.1.1.4.6. Autocorrelación de un código de ruido pseudoaleatorio

Las secuencias *PN* tienen una propiedad importante: versiones desplazadas en el tiempo de las mismas secuencias *PN* tienen una correlación muy pequeña una con la otra.

La autocorrelación es la medida de la correlación entre un código *PN* y una versión del mismo código desplazado en el tiempo. En la figura 49 se muestra la función de autocorrelación, en donde se observa claramente que es una función de dos valores. Cuando el tiempo de desplazamiento es más grande que el tiempo del chip, la correlación es muy pequeña.

Figura 49. Autocorrelación de un código *PN*



La canalización de los usuarios en el enlace reverso es llevado a cabo por la asignación de diferentes versiones de tiempo de desplazamiento del código largo, haciéndolos incorrelacionados entre sí. Esta propiedad es aprovechada para separar las señales de los suscriptores en las estaciones base receptoras.

2.1.1.4.7. Chips frente a distancia

Las estaciones base radian códigos *PN* cortos en el tiempo correcto, y debido a la velocidad de las ondas de radio, estas señales llegan al móvil en un tiempo retrasado. El móvil no conoce la distancia de la estación base, así, el móvil al mismo tiempo es desplazado del sistema en tiempo real por un camino en retraso.

Con la velocidad de la luz a 3×10^8 m/s, y un chip de código *PN* a 814 ns.:

- En un tiempo de un chip a la velocidad de la luz (o la velocidad de la onda de radio), éste se mueve 244 m.
- O acerca de 4 chips por kilómetro, 6 chips por milla.

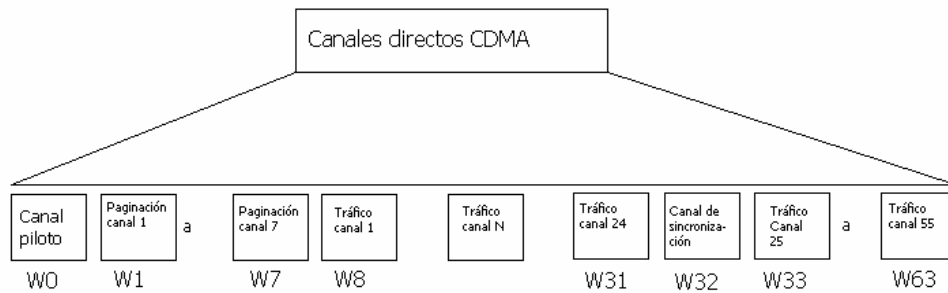
2.1.1.5. Códigos de los canales *CDMA*

Los códigos del canal *CDMA* en sentido directo, tienen asignados los siguientes códigos *Walsh* fijos:

- El canal piloto tiene siempre el código *Walsh* 0.
- El canal de sincronización tiene siempre el código *Walsh* 32.
- El canal de paginación usa los códigos *Walsh* 1-7.

En la figura 50 se muestra un esquema de la distribución de los códigos en los canales.

Figura 50. Distribución de códigos para los canales directos



FUENTE: **Qualcomm cdma University**. Pág 4.25

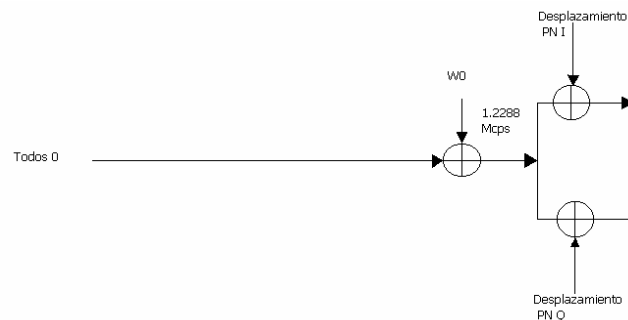
2.1.1.6. Pasos para generar cada código de canal

Cada código de canal se genera a través de: expansión en cuadratura y filtrado.

2.1.1.6.1. Generación de canal piloto

El canal piloto no contiene información, ni mensajes, ni datos. El canal piloto es simplemente todos los ceros expandidos por código *Walsh 0* y por los códigos *PN* cortos, tal como se muestra en la figura 51.

Figura 51. Generación de canal piloto



FUENTE: **Qualcomm cdma University**. Pág 4-29

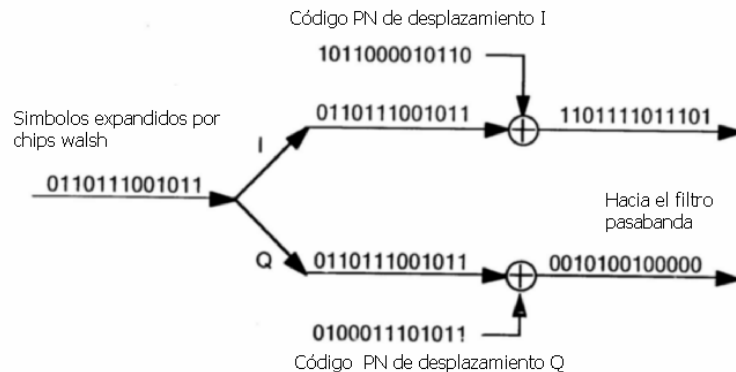
2.1.1.6.2. Expansión en cuadratura

Toda expansión realizada por una secuencia de código *Walsh*, el canal de tráfico directo es expandido en cuadratura. Toda la información es enviada hacia ambos I y Q, haciendo la modulación de los datos en *BPSK*.

Cada uno es expandido usando un código de ruido pseudoaleatorio. Estos códigos *PN* cortos son un segunda capa de codificación que usa un sector de otro. Esto habilita la reutilización de los códigos *Walsh* en cualquier sector.

Los códigos I y Q son desplazados por la misma cantidad. Los códigos I y Q son ambos de longitud 2^{15} bits, pero son diferentes códigos. En la figura 52 se muestra la expansión en cuadratura.

Figura 52. Expansión en cuadratura

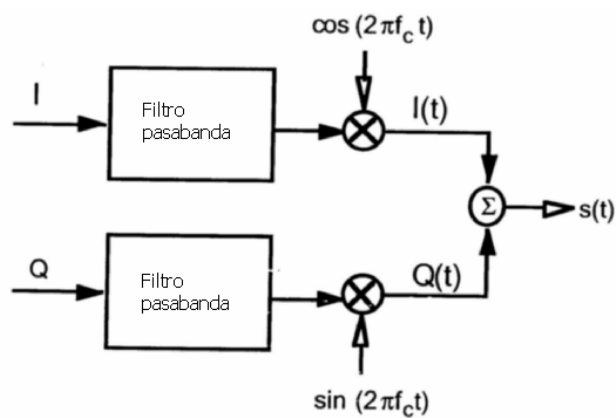


FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 4-31

2.1.1.6.3. Filtrado y conversión

En la figura 53 se indica que el canal de tráfico directo IS-95 emplea expansión *QPSK*. En la conversión a la frecuencia de radio se usan las funciones seno y coseno, cuya frecuencia es f_c .

Figura 53. Filtrado y conversión

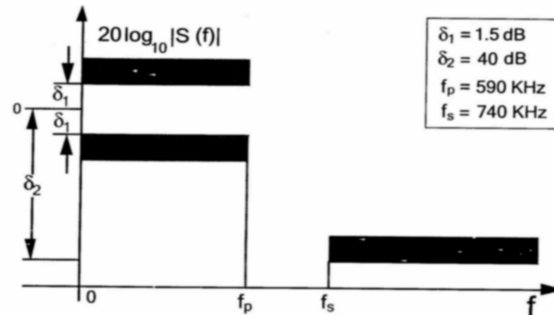


FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 4-32

2.1.1.6.4. Filtro enmascarado 1x

La forma de onda expandida debe ser restringida a un ancho de banda autorizado. Para ello, un filtro pasa bajas enmascarado es especificado. A 3 dB, el ancho de banda del filtro es 615 KHz. En la figura 51 se muestran las características del filtro enmascarado.

Figura 54. Características del filtro enmascarado

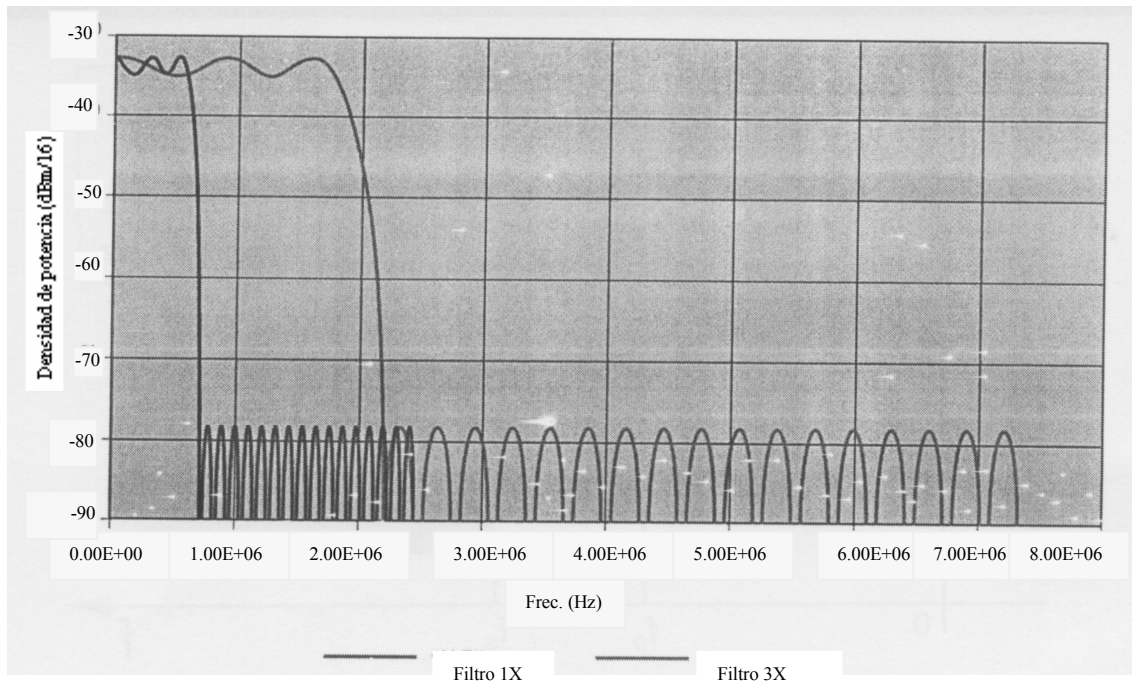


FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 4-33

2.1.1.6.5. Filtro transmisor

El filtrado de la señal banda/base es una combinación de técnicas digitales y analógicas. En la figura 55 se muestra la respuesta en frecuencias de los filtros digitales 1x y 3x.

Figura 55. Respuesta en frecuencia de los filtros digitales 1x y 3x

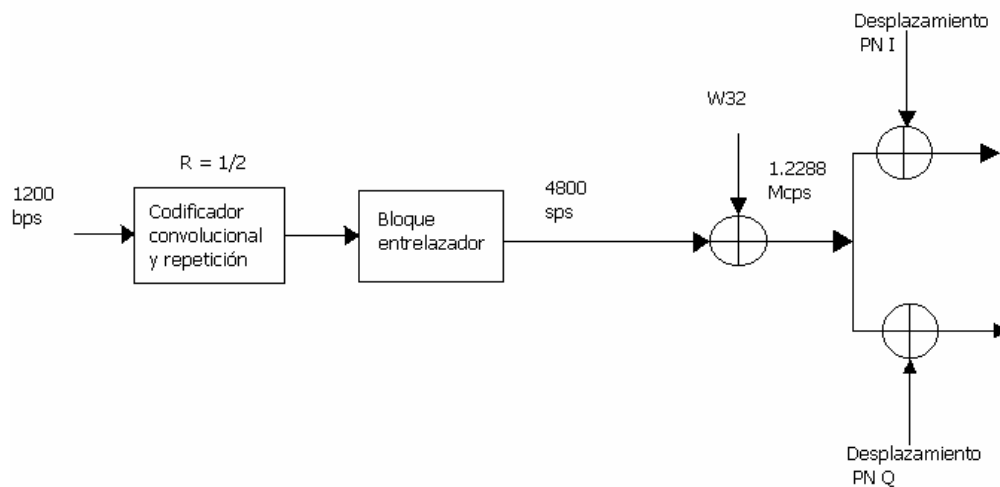


FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 4-34

2.1.1.6.6. Diagrama de bloques del canal de sincronización

El canal de sincronización transmite un mensaje. La codificación del canal es usada para proteger los bits de este mensaje. La tasa de $\frac{1}{2}$ de codificación es usada seguida del bloque de entrelazado. El canal de sincronización es expandido por código *Walsh* 32. En la figura 56 se muestran los bloques funcionales del canal de sincronización.

Figura 56. Canal de sincronización de tráfico directo

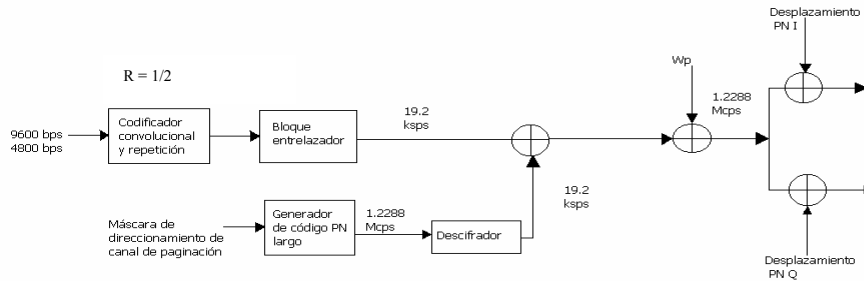


FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 4-35

2.1.1.6.7. Diagrama de bloques del canal de paginación

En la figura 57 se muestra el diagrama en bloques del canal de PAGINACIÓN y se da a conocer la función de cada bloque.

Figura 57. Canal de paginación de tráfico directo



FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 4-36

2.1.1.7. Generación de ondas CDMA

Generalidades de la modulación de *CDMA2000*

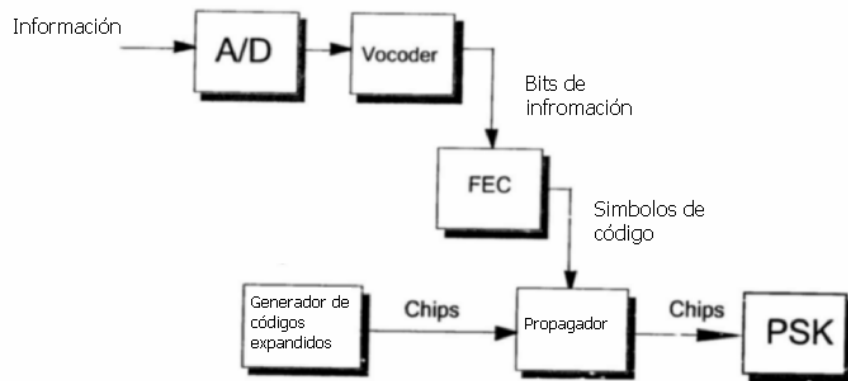
Los sistemas *CDMA2000* convierten la señal de voz análoga en una señal digital para la transmisión. Hay varios pasos en el proceso de transmisión digital. Muchos de estos pasos son comunes en los esquemas digitales inalámbricos. Después de cada paso en el proceso digital, la señal tiene diferentes significados y varios términos son usados para referir a la señal en las diferentes etapas del proceso.

El bit: un bit es la unidad fundamental de la información: es un simple dígito binario. La información análoga es codificada en una secuencia de dígitos binarios (conversión A/D). Datos de usuario y códigos de detección de errores son considerados como bits. La tasa de bits (bits por segundo) es una medida del volumen de la información que va a ser transmitida.

El símbolo de código: en los sistemas *CDMA2000*, un símbolo de código es la salida del proceso de codificación (corrección de error de envío *FEC*). Cada *bit* produce diversos símbolos de código. La tasa de símbolos es una medida de la redundancia introducida por el *FEC*. Cada símbolo es también un simple dígito binario.

El chip: los dígitos de salida de un generador de códigos expandidos son comúnmente denominados chips. Un chip es también un simple dígito binario. Varios chips son usados para expandir un simple símbolo de código. La tasa de chips es una medida de la cantidad de expansiones realizadas. En la figura 58 se muestra un esquema de cómo se relacionan estas tres terminologías.

Figura 58. Terminología bit, símbolo y chip



FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 4-4

2.1.1.7.1. Tasas de expansión

CDMA2000 soporta dos diferentes tasas de expansión:

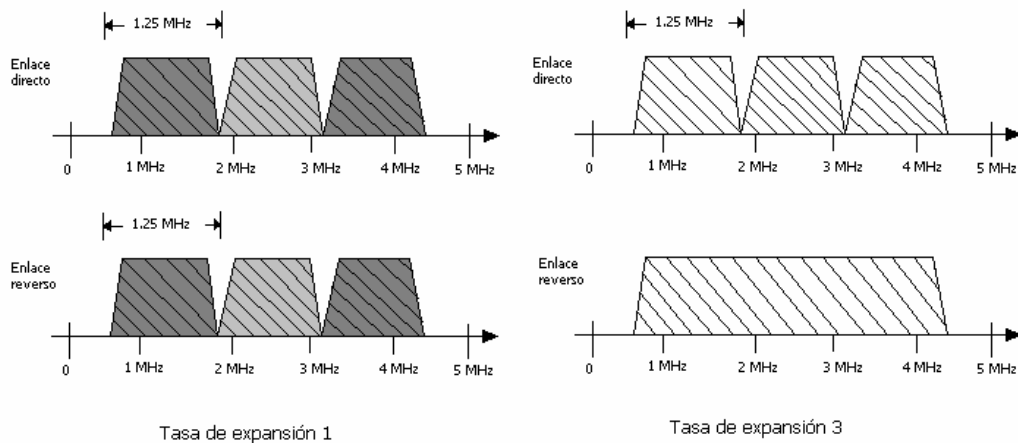
- **Tasa de expansión 1.** También llamada “1x”.

En ambos sentidos de los canales directo y reverso se usa una simple secuencia portadora expandida con una tasa de chip de 1.2288 Mcps.

- **Tasa de expansión 3.** También llamada “3x” o MC (multiportadora).
 - Los canales directos usan tres secuencias directas de portadoras expandidas cada una con un tasa de chips de 1.2288 Mcps.
 - Los canales reversos usan una simple secuencia de portadora expandida con una tasa de chips de 3.36864 Mcps.

En la figura 59 se muestran los anchos de banda para las tasas de expansión 1 y 3 para enlaces directo y reverso.

Figura 59. Tasa de expansión 1 y 3

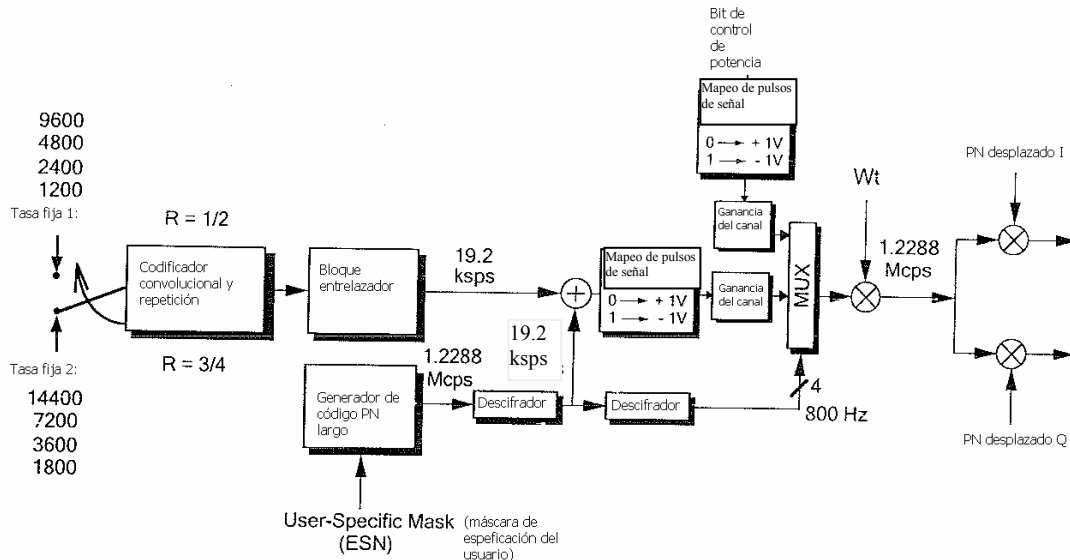


FUENTE: **Qualcomm cdma University.** Pág 4-6

2.1.1.7.2. Diagrama general para el canal de tráfico directo

En la figura 60 se muestra el diagrama de bloques del canal de tráfico directo.

Figura 60. Generación de canal de tráfico directo



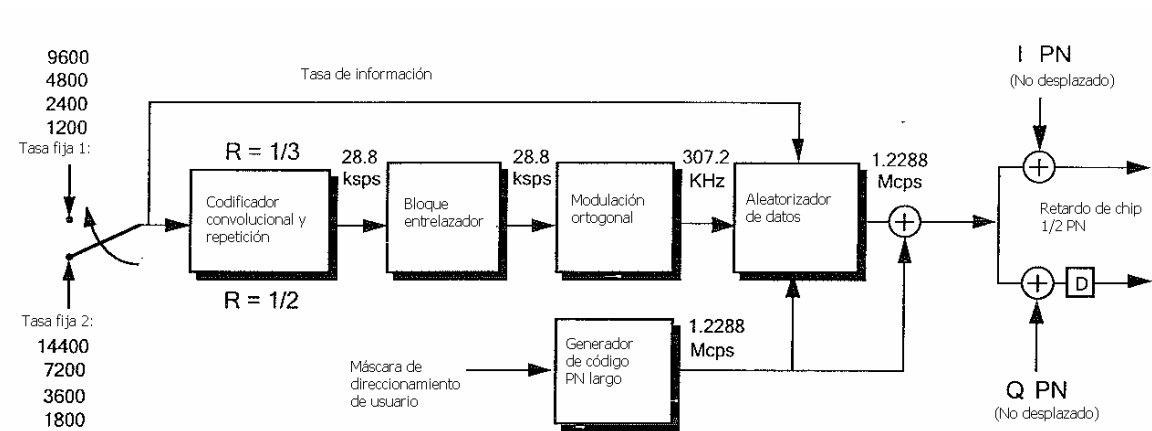
FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 4-40

1. Ambas tasas de los *vocoders* son soportadas.
2. La codificación convolucional es hecha diferentemente para los dos *vocoders*: ésta proporciona la redundancia de símbolos que utiliza el receptor para corregir errores.
3. Los símbolos son entrelazados: no es más que el reordenamiento de los símbolos.
4. El control de potencia de la información es “perforada” dentro y la señal es, entonces, expandida ortogonalmente.
5. La señal es expandida en cuadratura utilizando códigos pseudoaleatorios.

2.1.1.7.3. Generación de tráfico de canal reverso

La generación de canal de tráfico reverso es considerablemente diferente que la generación de canal de tráfico directo. El esquema de generación se muestra en la figura 61.

Figura 61. Generación de canal de tráfico reverso



FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 4-63

Ambos *vocoders* soportan las tasas 1 y 2. La codificación convolucional es empleada para proporcionar un *FEC* (*forward error correction*) y reducir el ruido en la señal para alcanzar una tasa de error aceptable. El entrelazado se realiza sobre el espacio de una trama del canal de tráfico. Los símbolos son leídos dentro del buffer y transmitidos alternando las filas. La estación base debe demodular la transmisión no coherente de los móviles. Para desarrollar la demodulación no coherente, los sistemas se diseñan, escogiendo el uso de una modulación ortogonal, como se muestra en el bloque

de modulación ortogonal del esquema anterior. Cuando la redundancia de la información es producida por la repetición de símbolos.

2.1.1.8. Demodulación de canales *CDMA*

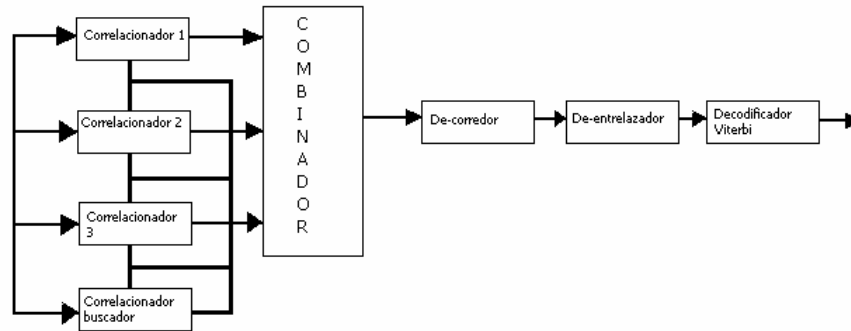
En *CDMA* se tiene un canal directo y un canal reverso.

2.1.1.8.1. Demodulación de canal *CDMA* directo

- La señal es convertida de las bandas de 800 MHz ó 1.9 GHz a la señal banda/base. La conversión A/D es llevada a cabo. La señal es ahora una señal banda/base digital.
- Los móviles están diseñados como herramientas receptoras de rastreo.
- Los correlacionadores realizan un producto de integración en orden para comprimir los códigos expandidos *PN* cortos y los códigos *Walsh* apropiados.
- La salida de los correlacionadores son combinadas en la tasa de símbolos.
- La señal es entonces de-corrida y de-entrelazada.
- El próximo paso es la decodificación *Viterbi*. El decodificador no conoce la tasa enmarcada del *vocoder* y debe decodificar todas las cuatro tasas, utiliza, entonces, la “métrica” para decidir cuál tasa fue probablemente la más próxima en ser transmitida.

En la figura 62 se muestra el diagrama de bloques para la demodulación de canal *CDMA* directo.

Figura 62. Demodulación de canal *CDMA* directo



FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 4-59

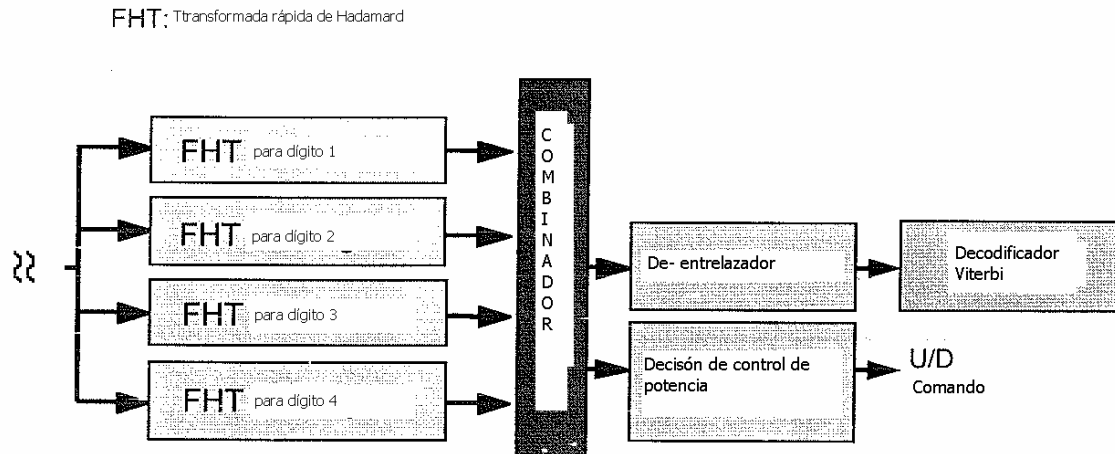
2.1.1.8.2. Demodulación de un canal *CDMA* reverso

La señal es convertida de las bandas de 800 MHz ó 1.9 GHz a una señal banda/base. Esta conversión es realizada en varios pasos, los cuales son los siguientes:

- La conversión analógica digital es realizada. La señal es ahora una señal banda/base digital.
- La estación base también implementa un diseño de rastreo del receptor.
- Los correladores realizan una integración de producto en orden para comprimir los códigos *PN* cortos. La transformada rápida de *Hadamard* es usada para detectar los símbolos de la modulación *Walsh*.
- Las salidas de los *FHT* son combinadas no coherentemente.
- La señal es de-entrelazada.
- El próximo paso es la decodificación *Viterbi*. Al igual que en el canal de tráfico directo.

En la figura 63 se muestra el esquema de la demodulación de canal de tráfico reverso.

Figura 63. Demodulación de canal CDMA reverso



FUENTE: Qualcomm cdma University. Pág 4-81

2.1.1.9. CDMA2000-1X

En este sistema, surge la integración de datos y de voz. El espectro de radio de *CDMA2000* está basado en el *CDMAOne*. El *CDMA2000* estándar ofrece cinco anchos de banda en cada dirección, tal como se muestra en la tabla IV con sus sufijos multiplicadores. Agrega un extra de 1.25 MHz para bandas de guarda en cada dirección.

Tabla IV. Anchos de banda en CDMA2000

Ancho de banda	Sufijo
1.25 MHz	1x
3.75 MHz	3x
7.5 MHz	6x
11.25 MHz	9x
15.05 MHz	12x

FUENTE: Adam Rosenberg , Sid Kemp. *CDMA Capacity and Quality Optimization*. Pág. 131

En la tabla V se muestran las capacidades estimadas para voz y datos en *CDMA*.

Tabla V. Capacidades estimadas para voz y datos en CDMA

	Capacidad de tráfico directo por sector	Capacidad de tráfico reverso por sector	Dirección	erlangs para una portadora	erlangs por sector 20 MHz	erlangs por MHz por celda
<i>N</i> = 7 AMPS	130.6	130.5	Ninguno		23.3	3.5
<i>N</i> = 4 GSM	164.5	164.4	Ninguno		54.8	8.2
cdmaOne	22.7	20.7	Reverso	16.2	317.0	47.5
cdma2000 voz	38.2	34.3	Reverso	28.3	530.9	79.6
cdma2000 datos	2.0	2.6	Directo	0.9	25.6	3.8
W-CDMA voz	130.5	157.4	Directo	119.3	504.2	75.6

	Capacidad de tráfico directo por sector	Capacidad de tráfico reverso por sector	Dirección	erlangs para una portadora	erlangs por sector 20 MHz	erlangs por MHz por celda
W-CDMA datos	5.6	7.3	Directo	3.4	17.6	2.6
TD-SCDMA voz	18.6	16.9	Reverso	12.9	198.4	59.5

FUENTE: Adam Rosenberg , Sid Kemp. *CDMA Capacity and Quality Optimization*. Pág. 389

2.2. Diseño y dimensionamiento de un sistema celular de voz

El dimensionamiento de un sistema celular se realiza considerando la probabilidad de bloqueo.

2.2.1. Definición de grado de servicio (*GOS*) en un sistema celular

De sus siglas en inglés *GOS* (*grade of service*), permite cuantificar el grado de congestión del sistema, los valores típicos del grado de servicio son <1%-5%. Como grado de servicio se utilizan las pérdidas de llamadas (P). Para este caso, se utiliza la fórmula de *Erlang B* (sistema de pérdidas), puesto que no hay sistemas de cola.

$$P_t = B(N, A) \text{ (probabilidad de congestión)} \quad (2.5)$$

donde:

P_t : Grado de rechazo

N : Número de canales

A : Tráfico

Para un grado de rechazo de llamada (P_t) y un tráfico ofrecido (A) determinados, se obtienen el número de canales necesarios (N). Se debe estimar el tráfico por celda (dándose la zona geográfica y la población de la misma). En una gran ciudad, el tráfico se estima en función de la superficie. Sin embargo, P también debe incluir las pérdidas por sombra en la zona de cobertura (P_c). Finalmente, el *GOS* será:

$$P = 1 - (1 - P_t)(1 - P_c) \quad (2.6)$$

2.2.2. Geometría celular

En estos tipos de sistemas hay que determinar:

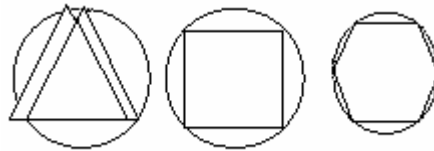
- Forma geométrica de la celda.
- Estructura geométrica del racimo: forma en que se agrupan las celdas.
- Análisis de interferencias y asignación de canales.

Se asume un mundo uniforme (emisión, propagación y tráfico). La densidad de tráfico y las pérdidas de propagación son uniformes. Un mundo uniforme implica utilizar celdas regulares equiespaciadas. Para mejorar la eficiencia espectral no debe haber traslape entre celdas (recubrimiento uniforme, sin dejar zonas vacías, pero sin que haya traslape).

Existen tres figuras geométricas que cumplen con los requisitos anteriores, el triángulo, el cuadrado y hexágono. Se exige figuras regulares, porque se ha supuesto pérdidas y tráfico homogéneo. A igualdad de radio, la figura que tiene un cociente superficie/radio o S/R mayor es el hexágono donde R es la mayor distancia del centro de la celda a los vértices.

De igual modo, en un sistema real se habla de celdas circulares, con lo que habrá traslapes y espacios libres. Si se aplica esto a los polígonos mencionados con anterioridad, se ve cómo el triángulo es el que presenta mayores espacios y traslapes, tal como se muestra en la figura 64.

Figura 64. Adaptación al sistema real



FUENTE: **Telecomunicaciones móviles**. s.d.e.

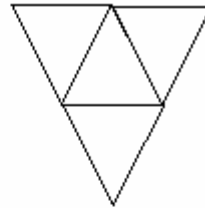
De lo anterior, se puede afirmar que el hexágono es el polígono, regular que permite minimizar el número de celdas para cubrir una superficie. En la figura 65 se muestran las tres figuras geométricas que cumplen los requisitos marcados. En todas se ha especificado la relación superficie-radio la cual, en cierta forma, da una medida de la potencia necesaria.

Figura 65. Geometría de las celdas básicas

TRIÁNGULO:



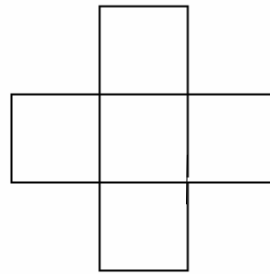
$$\frac{S}{R} = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot R}{4}$$



CUADRADO:



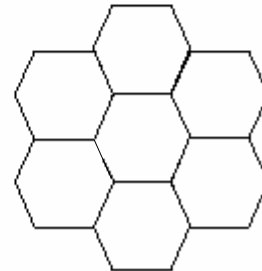
$$\frac{S}{R} = 2 \cdot R$$



HEXÁGONO:



$$\frac{S}{R} = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot R}{2}$$



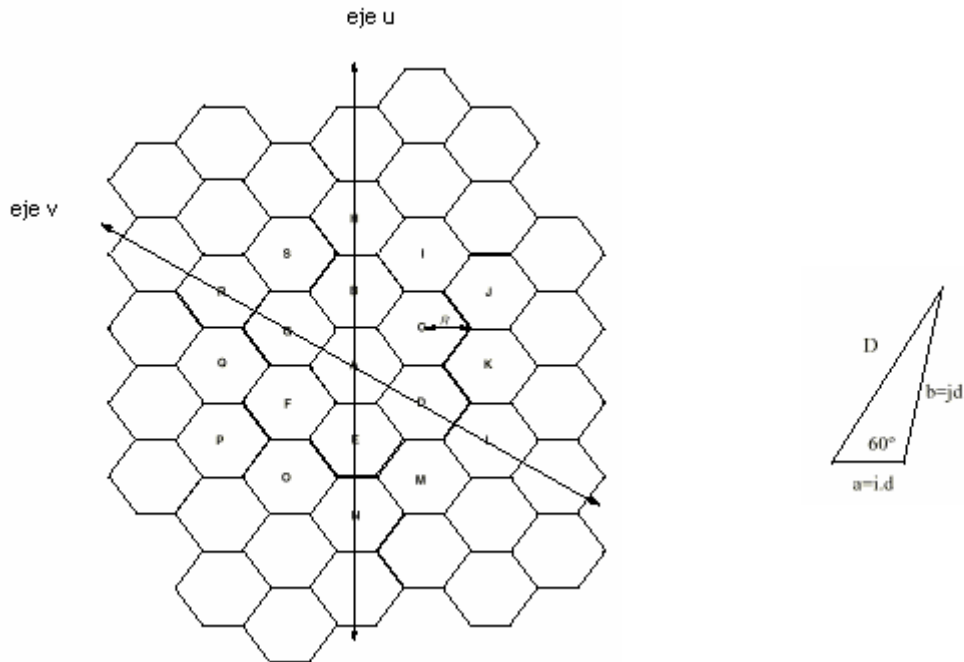
FUENTE: Telecomunicaciones móviles. s.d.e.

En la figura 65 se ve cómo es que el triángulo es el que peor relación tiene, es decir, se necesitaría mayor potencia para cubrir la misma superficie.

2.2.2.1. Generación del sistema celular hexagonal

Para el estudio del sistema hexagonal se emplean unos nuevos ejes coordenados que facilitan el cálculo de distancias. Se genera a partir de dos ejes, u y v , a 60° . Como se muestra en la figura 66.

Figura 66. Generación del sistema celular hexagonal



FUENTE: **Telecomunicaciones móviles**. s.d.e.

Cada vértice de los triángulos generados es un nodo de red y en ellos puede ser situado el centro de una celda.

La distancia de paso de retícula (d):

$$d = R\sqrt{3} \quad (2.7)$$

la distancia del nodo (i,j) al centro:

$$D^2(i, j) = d^2(i^2 + j^2 + i \cdot j) \quad (2.8)$$

Las celdas que dimensionan el sistema se agrupan en racimos, de manera que cada racimo utiliza todos los canales del sistema. Las celdas dentro de un racimo, que utilizan

los mismos canales, son las celdas cocanal. Si (i_c, j_c) son las coordenadas de la celda cocanal del origen, entonces:

$$D^2 = d^2(i_c^2 + j_c^2 + i_c \cdot j_c) = J \cdot d^2$$

$$(i_c^2 + j_c^2 + i_c \cdot j_c) = J$$

$$\left(\frac{D}{d}\right)^2 = J \rightarrow \frac{1}{3}\left(\frac{D}{R}\right)^2 = J \quad (2.9)$$

R es el radio de la celda hexagonal y J un número entero, llamado número rómbico que determina el número de celdas por racimo. Sin embargo, J no puede tomar todos los valores posibles, sino que dependerá de j e i, tal como se muestra en la tabla VI.

Tabla VI. Posibles valores de J

j	i	J
1	0	1
1	1	3
2	0	4
2	1	7
3	0	9
2	2	12
3	1	13

FUENTE: **Telecomunicaciones móviles**. s.d.e.

Las superficies de la celda y la del racimo serán:

$$S_{célula} = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot R^2}{2} \cong 2.598 \cdot R^2 \quad (2.10)$$

$$S_{racimo} = J \cdot S_{célula} = \frac{D^2 \cdot \sqrt{3}}{2} \quad (2.11)$$

El número total de racimos (factor de reutilización):

$$Q = E\left(\frac{S}{S_r}\right) + 1 = E\left(\frac{S}{J \cdot S_c}\right) + 1 = E\left(\frac{2 \cdot S}{D^2 \cdot \sqrt{3}}\right) + 1 \quad (2.12)$$

Se ve que Q aumenta cuando J o S_c disminuyen.

En cuanto a la relación portadora-interferencia:

$$\left(\frac{c}{\sum i}\right) = \left(\frac{c}{i}\right)_{total} \cong \frac{1}{u} \cdot \left(\frac{D}{R}\right)^n \quad (2.13)$$

En donde se ha supuesto en promedio, que la distancia entre la celda interferente y el móvil, es igual a la distancia entre celdas (D). Considerando el peor de los casos, el cual es que el móvil se encuentre en el límite de la celda (distancia = R); n es la constante de atenuación que para miniceldas (Km) vale aproximadamente 4. Por último, u es el número de celdas interferentes (correspondientes al primer anillo), normalmente 6. Al poner la relación D/R en función de K y luego de despejar se obtiene que:

$$J = \frac{1}{3} \cdot \left[u \cdot \left(\frac{c}{i}\right)_{total} \right]^{2/n} \quad (2.14)$$

Como la relación c/i debe estar por encima de un umbral r_p :

$$J \geq \frac{1}{3} \cdot [u \cdot r_p]^{2/n} \quad (2.15)$$

El umbral r_p depende del tipo de modulación utilizado y J es muy sensible a n (pérdidas de propagación). Como se muestra en la tabla VII.

Tabla VII. $J = f(n)$

n	J
2	101
3	15
3,5	9
3,75	7
4	6

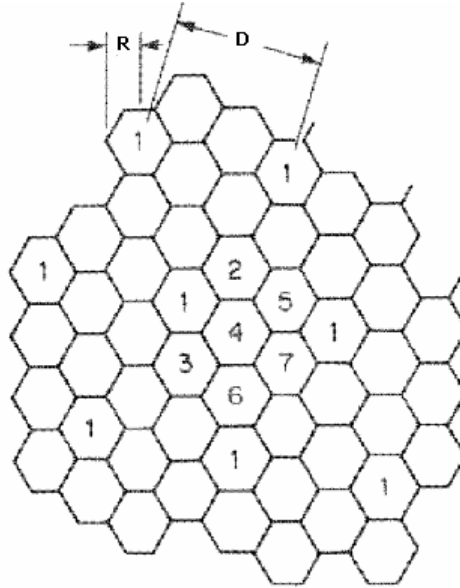
FUENTE: **Telecomunicaciones móviles**. s.d.e.

- Un valor típico es $J = 7$.
- Con valores grandes de J disminuye la oferta total de canales.

2.2.3. Interferencia cocanal

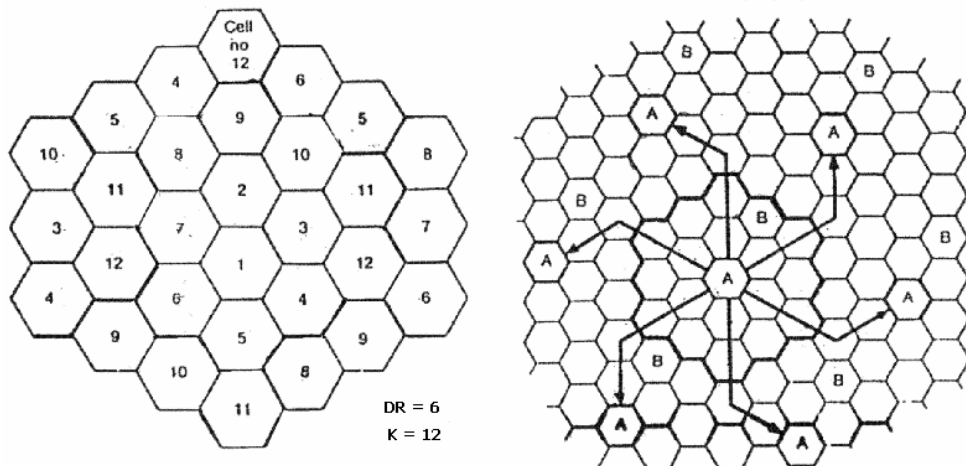
Como se sabe, todas las celdas del mismo nombre en distintos racimos comparten el mismo número de canales. Por tanto, es lógico pensar que entre ellas se producirán interferencias, lo que se llama celdas cocanal. Éstas se distribuyen en anillos, el primero es el más importante y el que se considera para los respectivos cálculos. En las figuras 67 y 68 se muestra lo comentado con anterioridad para distintos tamaños de racimos.

Figura 67. Interferencia cocanal para $J = 7$



FUENTE: Telecomunicaciones móviles. s.d.e.

Figura 68. Interferencia cocanal para $J = 12$ y $J = 19$



FUENTE: Telecomunicaciones móviles. s.d.e.

Si se tienen 10 racimos de 7 celdas cada uno, en total 70 celdas, y 280 canales iniciales, entonces, será posible asignar 40 canales por celda. Será posible suministrar $280 \cdot Q = 280 \cdot 10 = 2800$ canales finales.

- Canales iniciales: los concedidos por el organismo regulador.
- Canales finales: los conseguidos mediante reutilización.

Si se agrupan las 70 celdas en racimos de 3, se tiene $70/3 = 23$ racimos de 3, luego se tendría $23 \times 280 = 6440$ canales. El inconveniente es que el nivel de interferencia es mayor, para el caso de 7 celdas por racimo:

$$\left(\frac{D}{R}\right)^2 = 3J \xrightarrow{J=7} D = 4.7R$$

$$\left(\frac{C}{I}\right) = \frac{J \frac{P_T}{R^n}}{6J \frac{P_T}{D^n}} = \frac{1}{6} \left(\frac{D}{R}\right)^n = \frac{1}{6} 4.7^4 = 73.5 \equiv 19dB$$

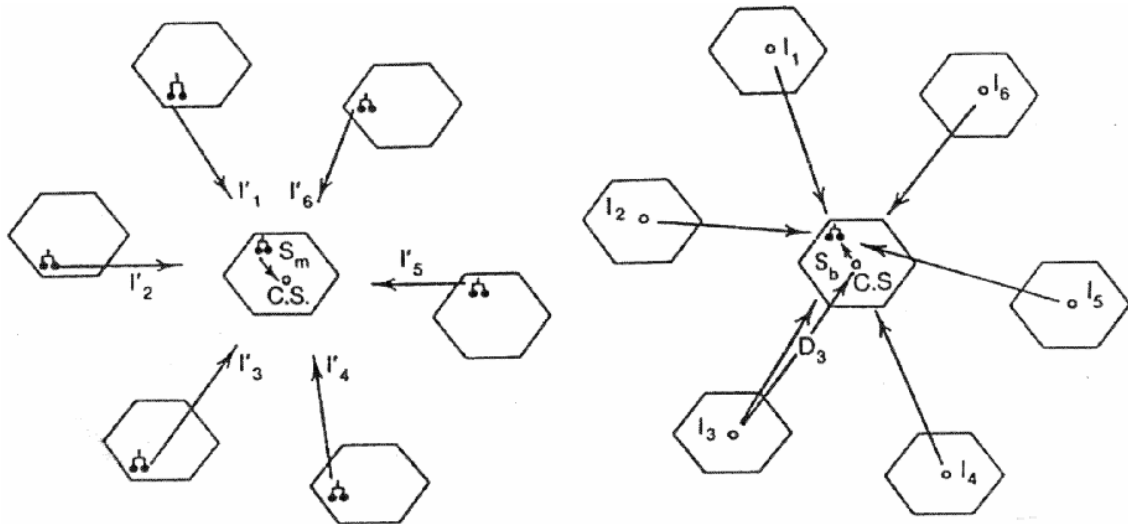
Para el caso de 3 celdas por racimo:

$$\left(\frac{C}{I}\right) = \frac{1}{6} 9^2 = 13.5 \equiv 11.3dB$$

es muy poca protección, luego no es posible emplear un sistema de racimos de tres unidades.

En la figura 69 se observa con mayor detalle el efecto de la interferencia de las celdas cocanal del primer anillo, sobre la comunicación de un móvil y la estación base de la celda en la que se encuentra.

Figura 69. Interferencia cocanal



FUENTE: **Telecomunicaciones móviles.** s.d.e.

En el primer caso, se ve cómo la transmisión del móvil a su estación base se ve afectada por la transmisión de los móviles situados en las celdas cocanal. En el otro caso, es el móvil, el que además de la comunicación de su estación base recibe la de las estaciones base de las celdas cocanal. Para conseguir una comunicación aceptable, la relación entre las potencias deseada e interferente debe estar por encima de un determinado umbral. Esta relación dependerá de la distancia del radio del primer anillo.

Cuanto mayor sea el número de celdas por racimo, mayor será el radio del primer anillo y, por tanto, mayor será la protección contra la interferencia. En lo que se refiere a este factor, interesa un número grande de celdas por racimo, pero en su contra tiene el costo que esto significa.

2.2.4. Dimensionamiento de un sistema celular de voz

Al suponer que el recurso espectral disponible para realizar la comunicación es $2B$ para las dos bandas (canal ascendente y canal descendente), el número de canales dobles (dos sentidos) disponibles viene dado por:

$$C = \frac{B}{\Delta f} \quad (2.16)$$

donde:

C : Número de canales iniciales disponibles.

Δf : el ancho de banda de cada canal dúplex.

Si el racimo tiene J celdas, el número de canales por celda será:

$$N = \frac{C}{J} \quad (2.17)$$

La intensidad de tráfico que puede soportar una celda individual es:

$$A = B^{-1}(N - 1, P_t) \quad (2.18)$$

Son $N - 1$, ya que hay que distinguir entre los canales de usuario y los de acceso. Como mínimo hay que reservar un canal para señalización. Este canal puede ser compartido por muchos usuarios, ya que el tráfico de señalización es bajo.

Y el número de móviles al que se puede abastecer viene dado por:

$$m = \frac{A}{a} \quad (2.19)$$

“a” es el tráfico por móvil

$$a = \frac{H \cdot L}{3600} \quad (2.20)$$

H: el tiempo de la llamada (en segundos)

L: el número de llamadas por hora

Por unidad de superficie el tráfico viene dado por:

$$\rho_a = \frac{A}{S_c} \text{ (Erlangs/Km}^2\text{)} \quad (2.21)$$

donde S_c es la superficie de la celda (Km^2).

La superficie del racimo será:

$$S_r = J \cdot S_c \quad (2.22)$$

El número de racimos del sistema (factor de reutilización del canal) será:

$$Q = E\left[\frac{S}{S_r}\right] + 1 \approx \frac{S}{J \cdot S_c} \quad (2.23)$$

donde $E[S/S_r]$ representa el entero por debajo.

Q da el número de veces que se reutilizan los canales. Si $Q \uparrow \Rightarrow \text{GOS} \uparrow$.

La oferta de canales en toda la zona de cobertura del sistema (si se supone un solo canal de acceso) será:

$$Q \cdot J \cdot (N - 1) = C \cdot \frac{S}{S_r} = C \cdot \frac{S}{J \cdot S_c} \quad (2.24)$$

Donde $QJ(N - 1)$ es el número de canales por racimo y S , la superficie total que se va a cubrir.

Se puede ver como el número de canales ofertados aumenta cuando disminuye J o S_c . De los dos parámetros, el que mayor libertad de variación tiene es S_c (superficie de la celda), ya que J (celdas por racimo) está condicionado por la relación portadora/interferencia (J depende de la atenuación, a mayor atenuación menor J). Por lo tanto, si la atenuación es grande, J podrá ser más pequeño. Lo que siempre se podrá hacer es aumentar el número de racimos. Esto hace ilimitadas las posibilidades de ampliación. Disminuir J es difícil ya que interviene muy directamente en el cálculo de la distancia de reutilización.

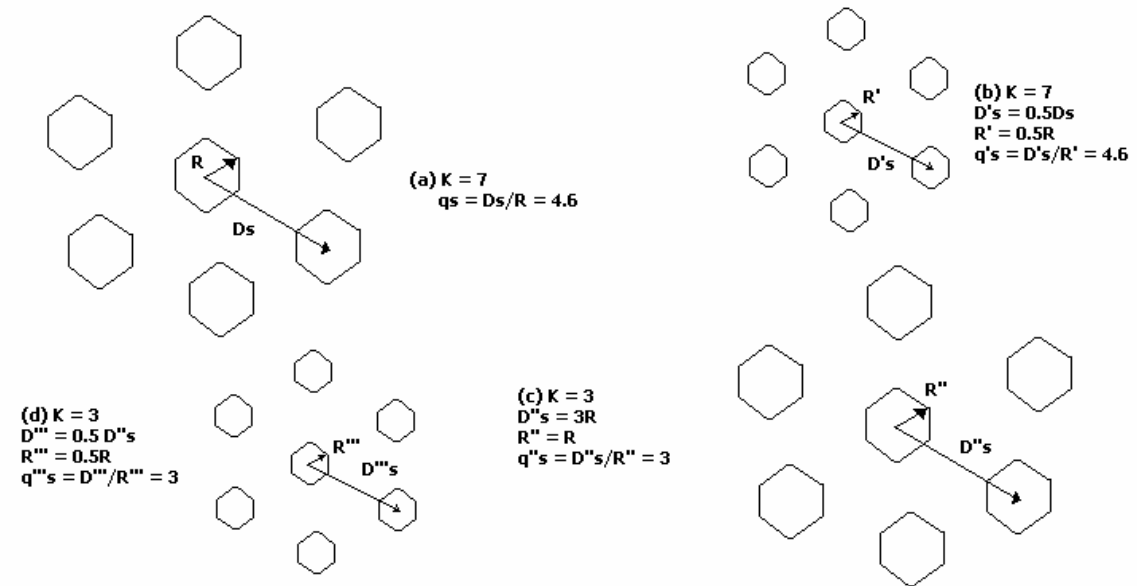
2.2.5. Aumento del número de usuarios

El problema que se plantea es, que con un sistema montado para abastecer a un número determinado de usuarios, este número aumente. Ante este problema, se plantean distintas soluciones.

2.2.5.1. Disminución del tamaño de las células

El problema que plantea esta solución es el costo que conlleva el tener que aumentar el número de estaciones base (aumento del número de celdas). Como se muestra en la figura 70.

Figura 70. Disminución del tamaño de la celda

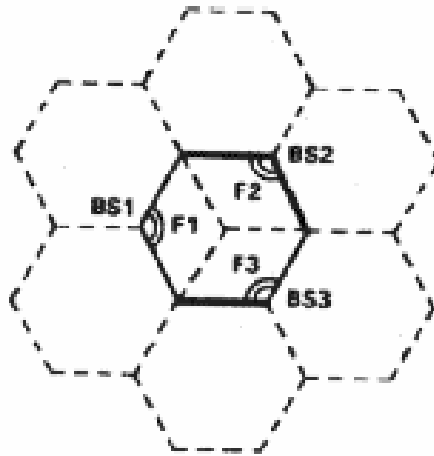


FUENTE: Telecomunicaciones móviles. s.d.e.

2.2.5.2. Sectorización

El objetivo de la sectorización es aumentar el número de canales sin aumentar el número de las estaciones base. Para ello, se sectoriza la cobertura, es decir, se subdivide la celda en tres sectores a los que da servicio desde los vértices alternos del hexágono, mediante tres estaciones base con haces de antena de 120° . Se cambia la antena omnidireccional que está en el centro de la celda por una directiva en un vértice, tal y como se muestra en la figura 71.

Figura 71. Sectorización



FUENTE: Telecomunicaciones móviles. s.d.e.

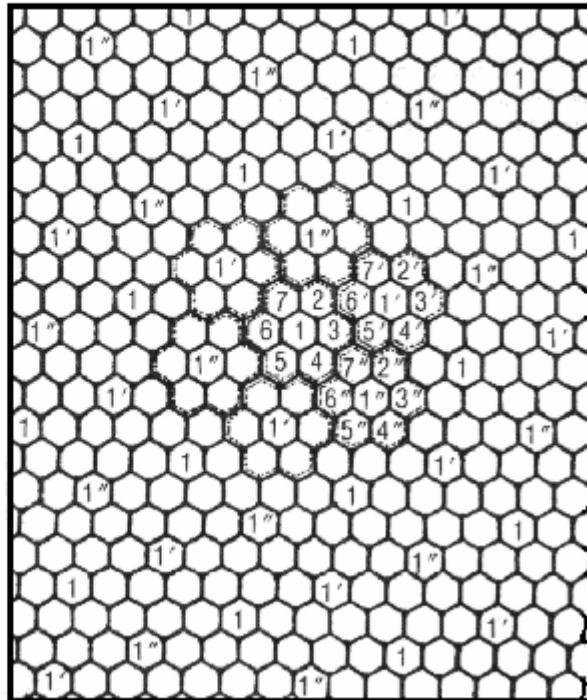
2.2.5.3. Sistema de *offset*

Este sistema permite relajar la relación portadora/interferencia exigida. El aumento de canales se consigue al disminuir la distancia entre celdas cocanal. Esto se puede hacer, ya que se efectúa un pequeño desplazamiento en las portadoras de las celdas cocanal. En la figura 72 se ve que las celdas cocanal del primer anillo se desplazan 10 ó 20 KHz de la original para que la interferencia afecte menos.

Figura 72. Sistema de *offset*

Set 1 No offset
 Set 2 10 KHz offset
 Set 3 20 KHz offset

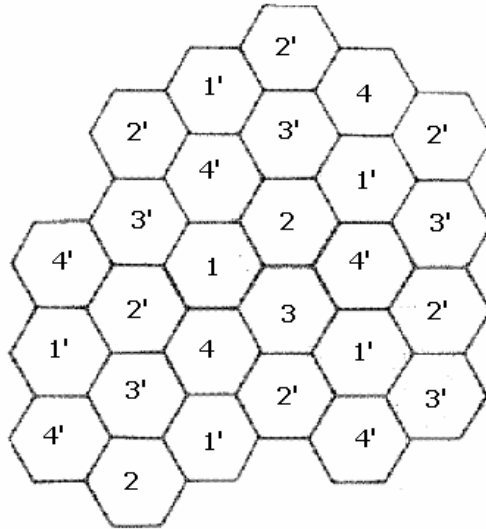
30 KHz	30 KHz	30 KHz	30 KHz	
1'	2'	3'	4'	
1''	2''	3''	4''	



FUENTE: Telecomunicaciones móviles. s.d.e.

En la figura 73 se puede observar un sistema de *offset* para tres canales (separación de 0, 10 y 20 KHz). Para el mismo $J=4$ (celdas racimo) se obtiene una calidad (portadora/interferencia) similar que para $J=7$.

Figura 73. Sistema de *offset* de tres canales, $J=4$



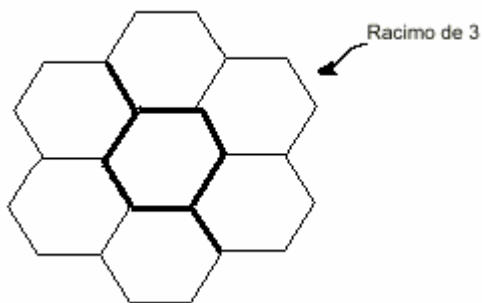
FUENTE: Telecomunicaciones móviles. s.d.e.

2.2.5.4. Sistema híbrido *overlay/underlay*

Con este sistema se consigue aumentar el número de canales ofrecidos a partir de un sistema ya implantado, además, se mantiene la protección frente a la interferencia.

En la figura 74 se muestra la realización de un racimo implementando esta técnica.

Figura 74. Sistema híbrido *overlay/underlay*



FUENTE: Telecomunicaciones móviles. s.d.e.

Se observa cómo las celdas son divididas en una celda interior y en un anillo encerrado entre las celdas interior y exterior. De esta forma el racimo de $J = 7$ inicial, queda dividido en racimos de $J = 3$ de celdas interiores y en uno de $J = 7$ de los anillos. El sistema funciona de forma que si un móvil se encuentra en el interior de una de las celdas interiores, trabajará con los canales de los racimos de $J = 3$. En caso contrario, lo hará con los canales del racimo de $J = 7$ (anillos).

El valor que ha de tener el radio de la celda interna denominado R' , para mantener la protección contra la interferencia será:

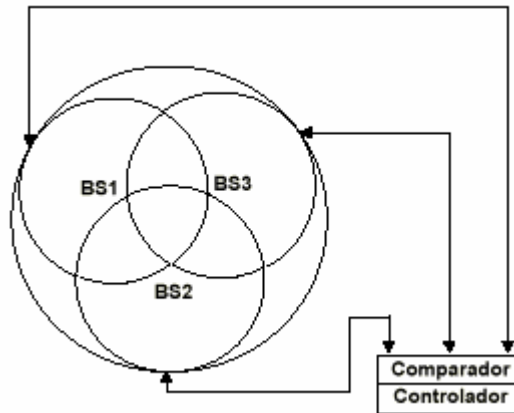
$$R' = \alpha \cdot R \quad (2.25)$$

$$\frac{c}{i} = \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{D}{\alpha \cdot R} \right)^n \xrightarrow{n=4} \frac{1}{\alpha^4} \cdot \frac{1}{6} \cdot (3 \cdot J)^2 \quad (2.26)$$

2.2.5.5. Sistema sin tránsitos

En los sistemas descritos con anterioridad, aparece el problema del tránsito (cambio de canal por parte del móvil al pasar de una subcelda a otra). La solución a este problema se muestra en la figura 75.

Figura 75. Sistema sin tránsitos



FUENTE: Telecomunicaciones móviles. s.d.e.

En la figura 75 se observa que la celda se divide en tres subceldas con una estación base (Tx/Rx) en cada una de ellas. Las tres estaciones base manejan los mismos canales. La función del comparador/controlador, es asignar una u otra en la comunicación con el móvil, según sea el nivel de señal recibido. Al compartir las estaciones base las mismas frecuencias (dentro de una celda), el móvil no se verá obligado a cambiar de canal cada vez que pase de una subcelda a otra.

Una ventaja asociada a este sistema es la disminución de la potencia necesaria para la Tx en las estaciones base, al ser menor la cobertura que han de cubrir. Esto trae consigo una menor interferencia cocanal, con lo cual se puede reducir la distancia (D) entre celdas cocanales y, con ello, aumentar el número de racimos.

2.3. Adaptaciones para transmisión de datos

Incluye protocolos y servicios del sistema celular para el tráfico de datos.

2.3.1. IS-856

El protocolo de revisión *IS-856* incluye las siguientes capacidades:

- Altas tasa de datos: 3.1 Mbps para el enlace directo y 1.8 Mbps para el enlace reverso.
- Alta capacidad del sistema.
- Soporte para aplicaciones de baja latencia.

IS-856 y *EV-DO* habilitan servicios de multimedia que incluyen audio, video e imagen de alta resolución. El apoyo para las aplicaciones de baja latencia habilitan varias aplicaciones útiles (como por ejemplo telefonía, video, *VoIP* y juegos de baja latencia). También incluye la habilidad de priorizar en baja latencia.

2.3.2. CDMA2000 (1XRTT)

CDMA2000 1xRTT o fase 1, como podría ser *3xRTT*, es completamente compatible con la infraestructura *IS-95* y las unidades suscriptoras. También soporta todos los servicios existentes de la *IS-95* tales como voz, circuitos conmutadores de datos, *SMS*, abastecimiento sobre el aire, y activación. *CDMA2000 1xRTT* soporta *handoffs* con *IS-95*, el cual usa la misma portadora como también otras diferentes.

Desde el punto de vista de un operador, la migración de 2G a 3G vía la estrategia 2.5G, sin tener en cuenta la plataforma de acceso a la tecnología escogida, es necesario ver los siguientes problemas:

- Capacidad
- Cobertura
- Claridad
- Costo
- Compatibilidad

2.3.2.1. Problemas del despliegue

Uno de los primeros problemas que vino en la determinación de cómo desplegar el sistema *CDMA2000-1x*, además de la estimación de la demanda, es cómo son determinados los procesos de asignación de canales. El método para asignar el canal para *1xRTT* puede tomar una pequeña variación cuando la decisión es solamente desplegar *1x*, como oposición a *1x* y *3x*. La variante es debida, principalmente, al problema de las bandas de guarda que son diferentes para *1x* y *3x*. El esquema del canal asignado recomendado para ambas bandas de frecuencia celular y *PCS* se muestra en las tablas VIII y IX.

Tabla VIII. Esquema de asignación de portadora en el sistema *CDMA2000-1x*

Sector del sistema IS-95	Portadora	Desplazamiento PN	Portadora CDMA2000-1x	Desplazamiento PN
Alfa	1	6	1	6
	2	6	2	6
Beta	1	18	1	18
	-	-	2	18
Gamma	1	12	1	12
	-	-		

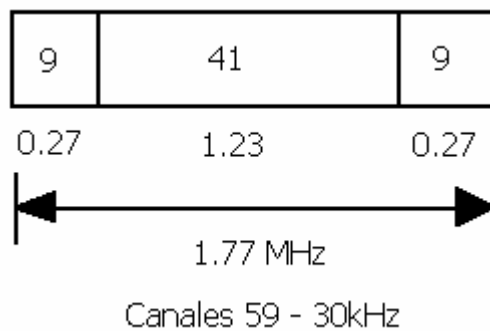
Tabla IX. Esquema de asignación de portadora en un sistema *PCS CDMA2000-1x*

Fuente	Destino	Tipo de destinación de canal de tráfico
IS-95	IS-95	IS-95
IS-95	IS-2000	IS-95
IS-2000	IS-95	IS-95
IS-2000	IS-2000	IS-2000

FUENTE: Clint Smith, P.E., Daniel Collins. **3G Wireless Networks**. Pág. 203

La gráfica del canal listado aquí requiere una banda de guarda, y la banda de guarda para un simple *CDMA2000-1x*, el cual es el mismo como un *IS-95*, se muestra en la figura 76.

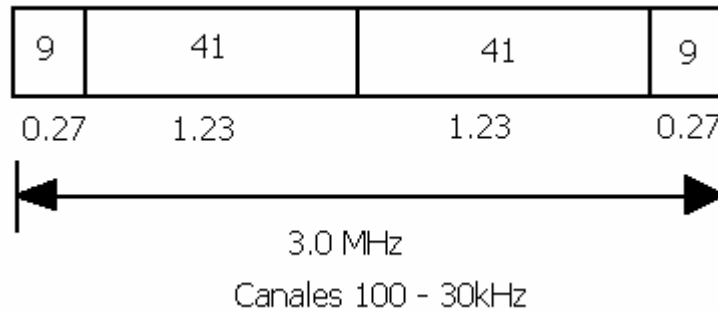
Figura 76. Banda de guarda para un canal simple *CDMA2000-1x*



FUENTE: Clint Smith, P.E., Daniel Collins. **3G Wireless Networks**. Pág. 204

En la figura 77 se muestran los requisitos para la implementación de un segundo canal y el impacto global sobre el espectro o la existencia de un plan de canal que podría existir en un sistema inalámbrico.

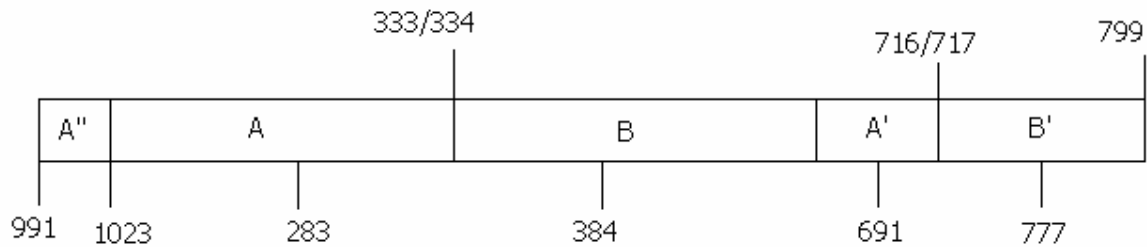
Figura 77. Banda de guarda para dos canales *CDMA2000-1x*



FUENTE: Clint Smith, P.E., Daniel Collins. **3G Wireless Networks**. Pág. 204

En la figura 78 se muestra el esquema del despliegue de un canal en un sistema celular o *PCS*, *CDMA2000* que podría ser implementado en la banda *SMR* (*specialized mobile radio*).

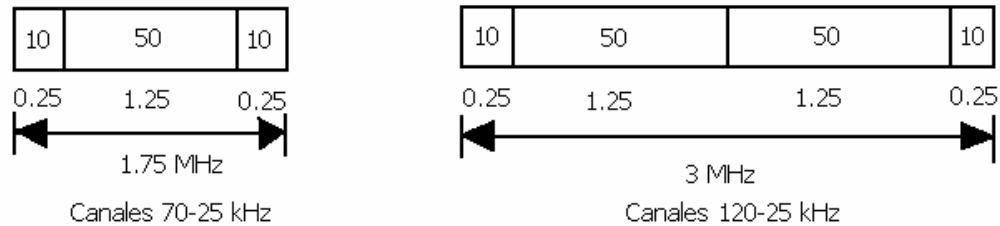
Figura 78. Portadoras preferidas para sistemas celulares *CDMA*



FUENTE: Clint Smith, P.E., Daniel Collins. **3G Wireless Networks**. Pág. 204

La figura 79 es una indicación de los requisitos del espectro para la implementación de *CDMA2000-1x* en la banda *SMR* (*specialized mobile radio*), la cual tiene un canal de ancho de banda de 25 kHz.

Figura 79. Requerimientos del espectro de *CDMA2000-1x* para *SMR*



FUENTE: Clint Smith, P.E., Daniel Collins. **3G Wireless Networks**. Pág. 205

Es importante ver que los requisitos del espectro requieren del control de canales contiguos dentro de un servicio de área definido, también dentro de la zona de guarda de la misma.

2.3.2.2. Arquitectura del sistema

Es importante ver que en *1xRTT* en *CDMA2000-1x* utiliza una tasa de expansión de 1 (*SRI*), la cual es directamente compatible con *IS-95* porque el sistema utiliza la misma tasa de expansión. *CDMA2000-1xRTT* ahora incorpora sesiones de paquete de datos y este cambio es implementado a través del uso de nuevos *vocoders* y también de elementos de tarjeta del canal.

2.3.2.3. Planificación de la frecuencia

La planificación de la frecuencia para *CDMA2000-1x* es la misma que se hace con *IS-95*. Lo que es importante es que los desplazamientos *PN*, son usados para sectores existentes, si *IS-95* es desplegado, puede ser usado para *CDMA2000-1x*. En la tabla X se muestra la relativa facilidad de introducir un canal *CDMA2000-1x* de voz espectral, en el sistema existente.

Tabla X. Desplazamientos *PN*

Sistema IS-95 Sector	Portadora	Desplazamiento PN	CDMA2000- 1x Portadora	Desplazamiento PN
Alfa	1	6	1	6
	2	6	2	6
Beta	1	18	1	18
	-	-	2	18
Gamma	1	12	1	12
	-	-		

FUENTE: Clint Smith, P.E., Daniel Collins. **3G Wireless Networks**. Pág. 209

2.3.2.4. Handoff

Los tipos de *handoff* envueltos con *CDMA2000* son los siguientes:

- *Soft*
- *Softer*
- *Hard*

Además de las situaciones de *handoff* listadas en la tabla XI, los sistemas *CDMA2000* pueden también interactuar con canales analógicos *AMPS* enlazando los sistemas *IS-95* por la realización del *handoff* tipo *hard*.

Tabla XI. Tabla de compatibilidad del *Handoff*

Fuente	Objetivo	Tipo de canal de destinación de tráfico
IS-95	IS-95	IS-95
IS-95	IS-2000	IS-95
IS-2000	IS-95	IS-95
IS-2000	IS-2000	IS-2000

FUENTE: Clint Smith, P.E., Daniel Collins. **3G Wireless Networks**. Pág. 210

2.3.2.5. Métodos de cálculo de tráfico

Un operador puede proponer diversos métodos para estimación de la cantidad de voz y paquetes de tráfico con memorias para llevar a cabo *CDMA2000 1xRTT*.

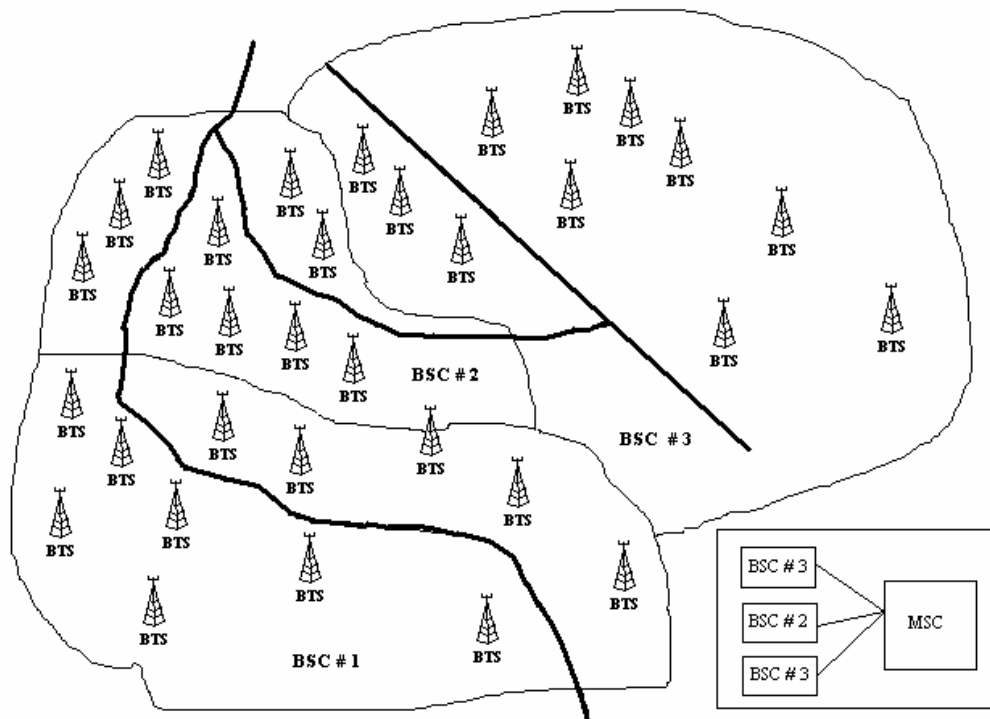
Los cálculos de tráfico son realizados a través de dos métodos: las aproximaciones denominadas de previsión (*forecast*) y de descubrimiento (*discovery*). El primero involucra detalles de análisis de tráfico de voz existente; el otro, se acerca en el centro de la red, un canal 1x reemplaza a los canales F1 y F2 (frecuencias) que ya se despliegan. Aquí se determina el número de móviles de los que sería capaz *1xRTT* y entonces se multiplica este número por 70 Kbps.

2.3.2.6. Despliegue

El despliegue de *CDMA2000* en una nueva red es diferente que la integración de éste en una red existente. Específicamente, los volúmenes de tráfico y el uso de modelos son indefinidos en un sistema inicial, lo principal en una distribución de tráfico homogéneo, el enfoque está más orientado a la cobertura.

En la figura 80 se muestra un ejemplo de un sistema hipotético que tiene un despliegue total *IS-95*, en el cual se muestran una o dos portadoras por sitio.

Figura 80. Muestra de distribución del sistema *IS-95*

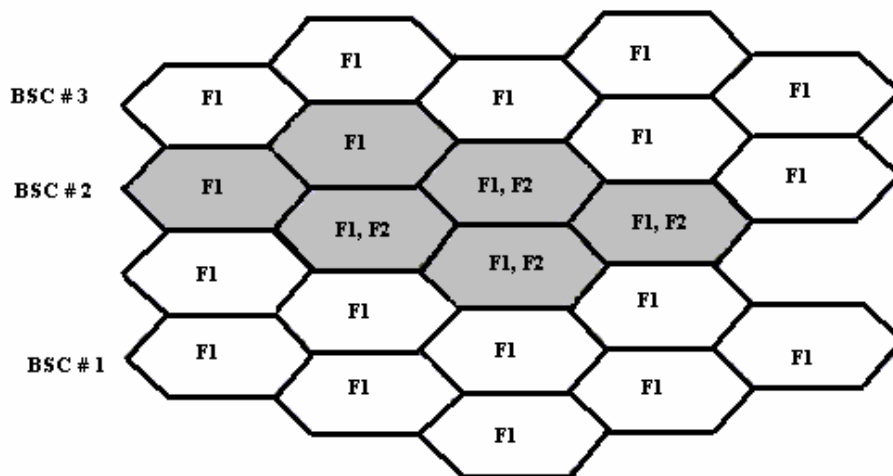


FUENTE: Clint Smith, P.E., Daniel Collins. *3G Wireless Networks*. Pág. 212

El esquema anterior envuelve un total de tres *BSC* que están conectadas a la misma *MSC*. Clasifican algunos por los caminos marcados por líneas gruesas que pasan entre las *BTS*. Se muestran, también, las fronteras de las *BSC*.

En la figura 81 se muestra un método más visual de cómo es que las *BTS* están asociadas con las *BSC* y las cantidades de portadoras que cada una tiene en operación. Este sistema tiene los tipos de *handoffs* de: *soft*, *softer* y *hard* que pueden tomar dentro de la red con *IS-95*.

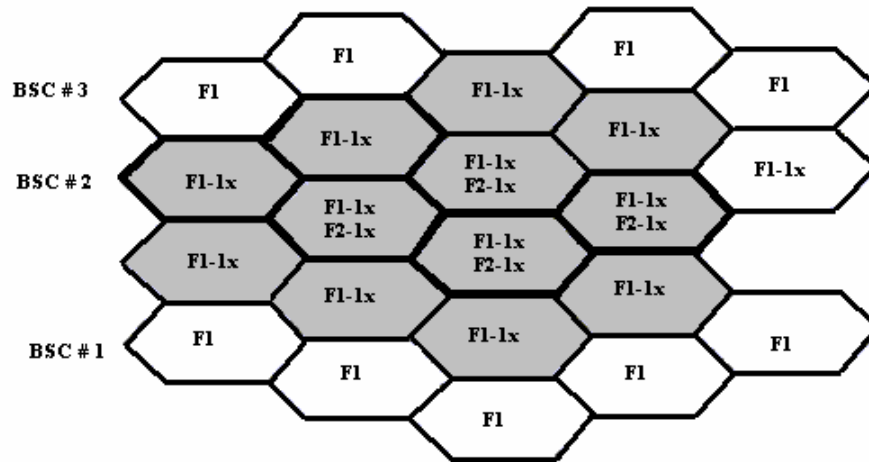
Figura 81. Portadora *IS-95* desplegada para un sistema de muestra



FUENTE: Clint Smith, P.E., Daniel Collins. **3G Wireless Networks**. Pág. 213

En la figura 82 se muestra un ejemplo de cómo *CDMA2000-1x* podría ser desplegado dentro de una red *IS-95* existente.

Figura 82. Esquema de despliegue de la portadora *CDMA2000-1x* dentro de un sistema *IS-95*



FUENTE: Clint Smith, P.E., Daniel Collins. **3G Wireless Networks**. Pág. 214

Para el despliegue existen dos tipos de problemas: el primero de ellos es que ninguna portadora nueva se agrega en la expansión, y las portadoras se actualizan de *IS-95* a lo que *CDMA2000-1x* es capaz. El segundo problema es que en *CDMA2000* solo se agrega a sitios que tienen una segunda portadora *CDMA* o son adyacentes a un sitio que tiene una segunda portadora *CDMA*. Los límites de las *MSC* permanecen igual, pero en realidad, se alterarían para minimizar el potencial de los *handoffs* de *BSC-BSC* para voz o sesiones de paquetes de datos.

2.3.3. *1xEV-DO*

1xEV-DO es la terminología usada para describir en tiempo no real, servicios de altos paquetes de datos que se ofrecerán en un canal de tasa expandida 1 (*SRI*) que solo transporte paquete de datos, de nombre *DO*. El objetivo de desplegar el servicio *1xEV-DO* es permitir a un número más alto de usuarios del sistema utilizar los servicios de paquete de datos. Al separar los usuarios de voz de los usuarios de datos hacia dos portadoras, producirá tasas más altas de datos para los usuarios, así también a lo largo de las portadoras. Los *1xEV-DO* se diseñan para ser directamente escalables a una

plataforma 3X. En la tabla XII se listan las proporciones de la tasa de datos previstas para *1xEV-DO*.

Tabla XII. Tabla *EV-DO*

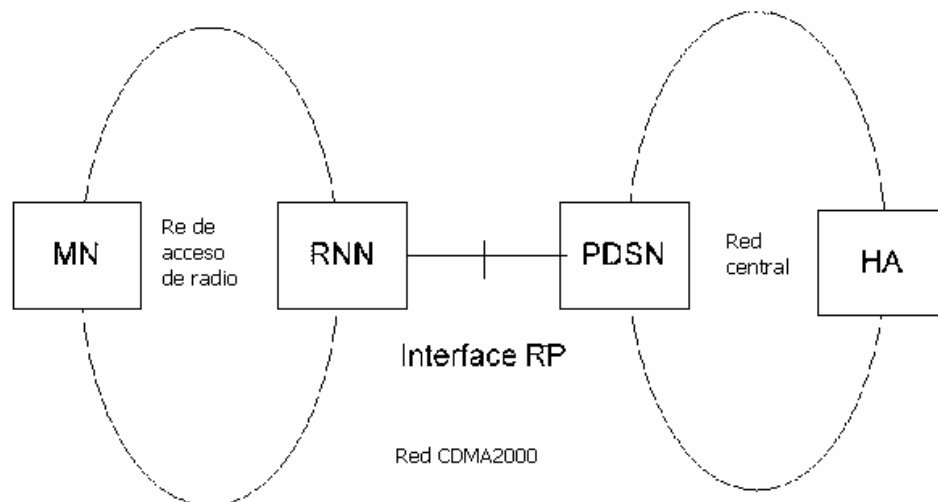
	Recepción	Transmisión
Edificio	2.4 Mbps	144 Kbps
Peatón	2.4 Mbps	144 Kbps
Vehicular	600 Kbps	144 Kbps
Vehicular (pico)	1.20 Mbps	144 Kbps

FUENTE: Clint Smith, P.E., Daniel Collins. **3G Wireless Networks**. Pág. 497

2.3.4. Interface *R-P*

La interface *R-P* (*radio paket*), para la red *CDMA2000*, tiene el diagrama que se muestra en la figura 83.

Figura 83. Interface *R-P*



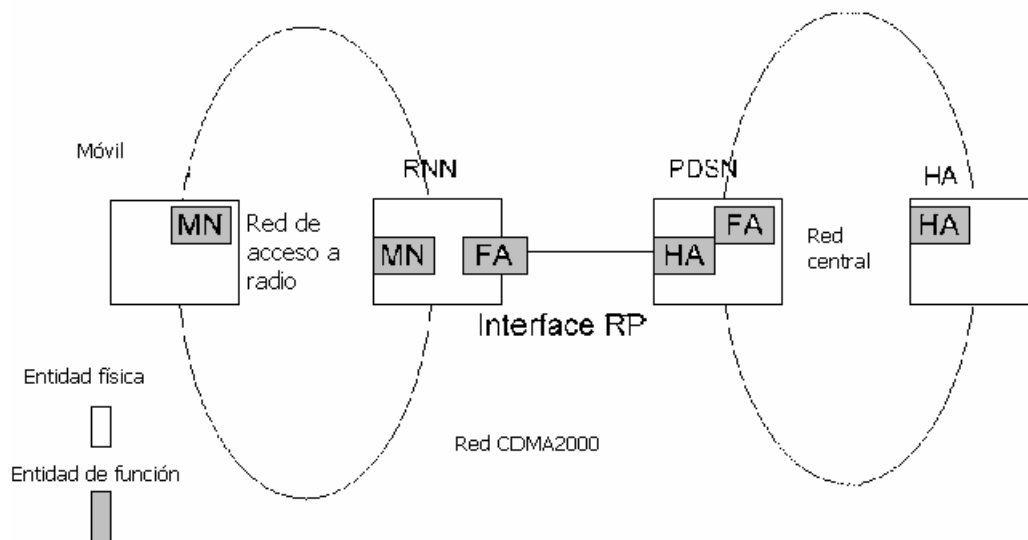
FUENTE: **Telecomunicaciones móviles**. s.d.e.

Dentro de las aplicaciones del *IP* móvil a la interface *R-P* se encuentran las siguientes:

- El móvil *IP* se apropia de los mensajes y extensiones.
- Define una nueva extensión: la extensión de sesión específica.

El modelo de función se muestra en la figura 84.

Figura 84. Modelo de función del interface *R-P*



FUENTE: **Telecomunicaciones móviles**. s.d.e.

2.3.5. Protocolo de conexión punto a punto (*PPP*)

PPP es un protocolo diseñado como un método estándar para permitir el intercambio de datagramas multiprotocolo entre dos elementos de una red mediante un simple enlace serie de comunicaciones punto a punto. El enlace debe ser *full-duplex* y garantizar una entrega ordenada de los paquetes. Es el sucesor a *SLIP* (*Serial Line IP*) para comunicación *IP* sobre líneas serie.

PPP está basado en tres grandes componentes:

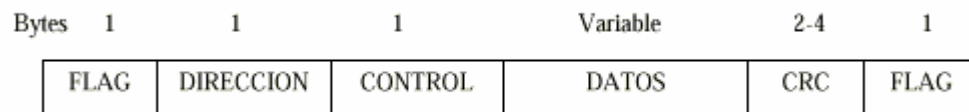
- Un método de encapsulación de paquetes de nivel de red sobre la conexión de enlace que gestiona. Provee multiplexación de diferentes protocolos de capa de red simultáneamente sobre el mismo enlace.
- *LCP (Link Control Protocol)*. Es el protocolo utilizado por PPP para establecer, configurar y testar la conexión de enlace. Los parámetros que se configuran son:

Opciones de encapsulación, manejar varios tamaños de paquetes, detección de bucles y fallos de configuración en los *hosts*, autenticación, terminación del enlace, etc.

- *NCP (Network Control Protocol)*. Gestiona las características propias de cada protocolo de red que se utilice. Establece y configura diferentes protocolos de capa de red.

PPP se basa en tramas de capa de enlace *HDLC (High-Level Data Link Control)*, como se muestra en la figura 85.

Figura 85. Tramas de la capa de enlace



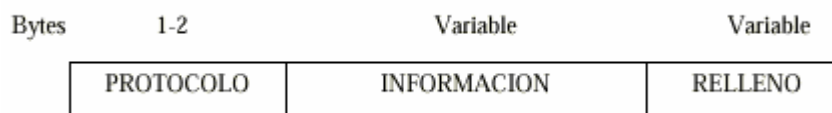
FUENTE: **Telecomunicaciones móviles**. s.d.e.

Siendo:

- *FLAG* : el valor binario 01111110 (7Eh) y siempre como delimitador de comienzo y finalización de trama.
- *DIRECCIÓN*: representa la dirección de enlace. En el caso de *PPP* siempre irá fijado con el valor 11111111 (FFh => Todas las estaciones) para evitar asignar direcciones de enlace de datos a cada estación particular.
- *CONTROL*: representa información de control del enlace, pero para *PPP* se prefija con el valor 00000011 (03h) como indicación de enlace fiable, con ello se evita el uso de acuses de recibo y números de secuencia. Se corresponde con *Un-numbered Information (UI)* de *HDLC* con el *bit P/F* puesto a cero.
- *DATOS*: será un campo de longitud variable, según sea el tipo de paquete *PPP*.
- *CRC*: representa el resultado de aplicar un código redundante cíclico a la trama y sirve como mecanismo de detección de errores en la misma. Normalmente, es de 2 *bytes*, aunque puede negociarse para medir 4 *bytes*.

El campo de datos de la trama *HDLC* específica para *PPP* contiene en el campo de datos los diferentes paquetes *PPP*. Éstos tienen la estructura mostrada en la figura 86.

Figura 86. Estructura de paquetes *PPP*



FUENTE: **Telecomunicaciones móviles**. s.d.e.

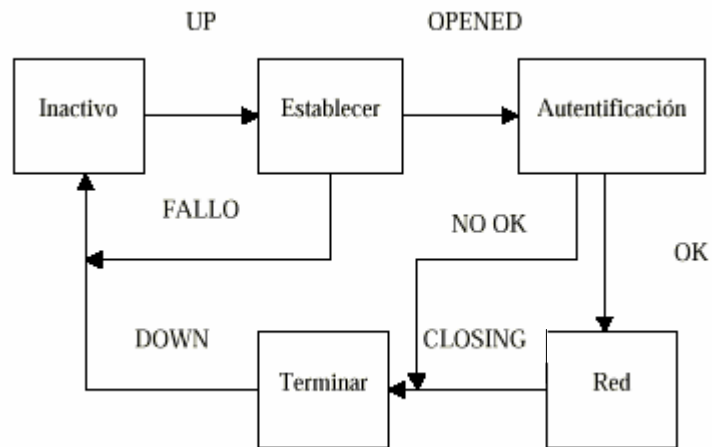
- **PROTOCOLO:** indica la clase de paquete que sigue en el campo INFORMACIÓN PPP. Se definen códigos para *LCP*, *NCP*, *IP*, *IPX*, *AppleTalk* y otros protocolos.
- **INFORMACIÓN:** contendrá 0 ó más *bytes*, según sea el campo PROTOCOLO. El tamaño máximo del campo viene fijado por el valor del *MRU* (*Maximun Receive Unit*), el cual está fijado por defecto al valor de 1500 *bytes*, puede tomar otros valores tras su negociación al establecer la conexión.
- **RELLENO:** permite completar el campo con *bytes* de relleno hasta alcanzar el número de *bytes* indicado en *MRU*.

Para establecer las comunicaciones sobre un enlace punto a punto, cada uno de los enlaces *PPP* debe primero enviar paquetes *LCP* para configurar y establecer el enlace de datos. Después de que el enlace ha sido establecido, el extremo debe ser autenticado.

Después, *PPP* debe enviar paquetes *NCP* para escoger y configurar uno o más protocolos de la capa de red. Una vez que cada uno de los protocolos de la capa de red han sido configurados, los datagramas de cada protocolo de red pueden ser enviados sobre el enlace.

El enlace permanecerá configurado para comunicaciones hasta que los paquetes específicos *LCP* o *NCP* cierren el enlace, o hasta que algún evento externo ocurra (un *timer* de inactividad expire o la intervención del administrador de la red). A continuación, en la figura 87, se muestra el diagrama de estados para configurar, mantener y terminar el enlace punto a punto.

Figura 87. Diagrama de estados para configurar y mantener el enlace punto a punto



FUENTE: Telecomunicaciones móviles. s.d.e.

Fase inactivo

El enlace comienza y acaba en esta fase. Cuando un evento externo (*UP*) (tal como detección de portadora o una configuración del administrador de red) indica que la capa física está lista para ser utilizada, *PPP* procederá a la fase de establecimiento del enlace. La desconexión de un módem lleva a la máquina de manera automática a este estado.

Fase de establecimiento del enlace

El protocolo de control del enlace (*LCP*) se utiliza para establecer la conexión. Esto se realiza tras el intercambio de paquetes de configuración. Una vez recibida la respuesta a la petición de configuración se entra en el estado *OPENED*. Si la respuesta es negativa se retorna al estado inactivo.

Fase autenticación

En algunos enlaces puede ser necesario requerir al extremo una autenticación antes de permitir que los paquetes de red sean intercambiados. Por defecto, esta opción está desactivada.

Fase de red

Una vez PPP ha finalizado las fases previas, cada protocolo de la capa de red (tales como *IP*, *IPX* o *AppleTalk*) debe ser configurado separadamente por el apropiado protocolo de control de red (*NCP*); durante esta fase, el tráfico en el enlace consta de cualquier combinación de *LCP*, *NCP* o paquetes de capa de red.

Fase de terminación

PPP en cualquier momento puede terminar el enlace. Esto puede suceder por una pérdida de portadora, fallo de autenticación, fallo de calidad del enlace, la expiración del temporizador de inactividad o un cierre administrativo del enlace.

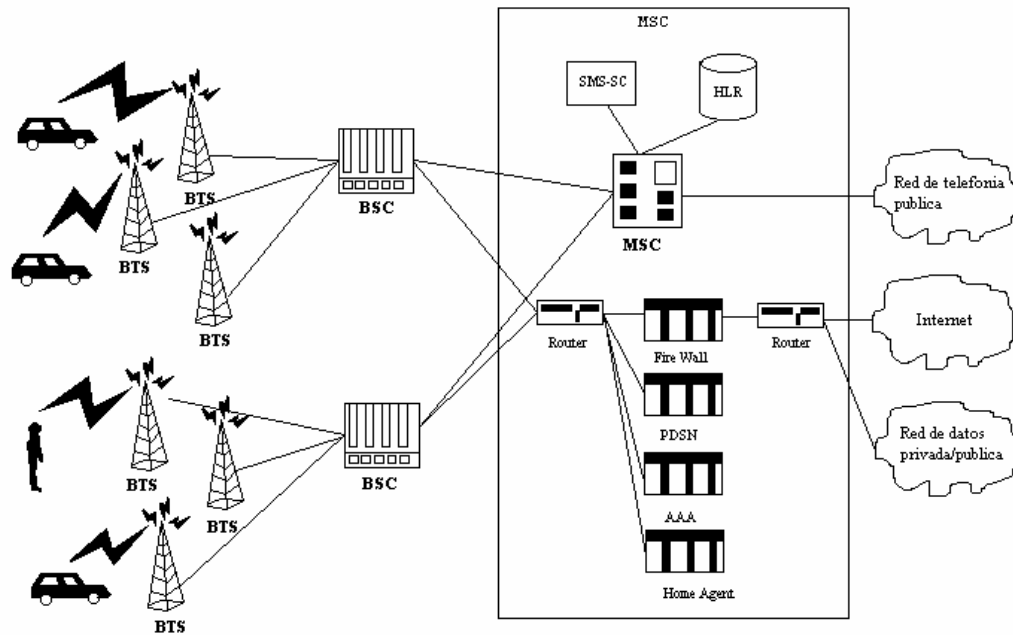
LCP utiliza un intercambio de paquetes de terminación del enlace para cerrar el enlace. El cierre del enlace es suficiente para acabar con la comunicación, no se necesita que cada protocolo de red lo realice.

2.3.6. Nodo de servicio de paquete datos (*PDSN*)

El *PDSN* es un nuevo componente asociado con el sistema *CDMA2000*, comparado a las redes *CDMAOne*. El *PDSN* es un elemento esencial en el tratamiento

de servicios de paquete de datos que podrían ser ofrecidos, y su localización en la red *CDMA2000* se muestra en la figura 88.

Figura 88. Arquitectura del sistema *CDMA2000*



FUENTE: Clint Smith, P.E., Daniel Collins. **3G Wireless Networks**. Pág. 288

El propósito del *PDSN* es soportar servicios de paquetes de datos y realizar la mayor parte de la siguientes funciones en el curso de una sesión de paquete de datos:

- Establecer, mantener y terminar las sesiones del protocolo punto a punto (*PPP*) con el suscriptor.
- Soportar ambos paquetes de servicio simple e *IP* móvil.
- Establecer, mantener, y terminar los enlaces lógicos con la red de radio (*RN*) a través de la interface *R-P*.
- Iniciar la autenticación, autorización y contabilidad (*AAA*) para el cliente de la estación móvil a el servidor *AAA*.
- Servicio para recibir los parámetros para el cliente móvil del servidor *AAA*.

- Enrutadores de paquetes, hacia y de, de las redes externas de paquetes de datos.
- Colecciona datos de uso que se relevan al servidor *AAA*.

La capacidad global del *PDSN* está determinada por el promedio de paquetes por unidad de tiempo y el número de sesiones *PPP* que son servidas. La capacidad específica del *PDSN*, depende de la infraestructura usada por el fabricante, así como también de la tarjeta particular de la población que es implementada. Es importante ver que la capacidad es solamente un aspecto del proceso de dimensionamiento y que la fiabilidad de la red general es un factor que debe ser dirigido en el proceso de dimensionamiento.

2.3.7. Servicios

Entre estos se encuentran: *WAP*, *MMS* y navegación en el internet.

2.3.7.1. Protocolo de aplicación inalámbrica (*WAP*)

El protocolo de aplicación inalámbrica (*Wireless Application Protocol WAP*) es uno de los muchos protocolos que van a ser implementados dentro del campo inalámbrico para el propósito de aumentar la movilidad y poner en servicio a usuarios móviles de internet. *WAP* es implementado por numerosos fabricantes de equipo móvil desde que es significativo para proporcionar un estándar abierto universal para teléfonos inalámbricos, los cuales son, celulares/*GSM*, y *PCS* con el propósito de dar internet y otros valores de servicios agregados.

WAP habilita a usuarios para soportar internet de manera limitada; esto es, que ellos pueden enviar y recibir e-mails, mientras la red soporta un formato de texto, sin gráficas, el cual con los sistemas 2.5G, lo habilitarían con el requisito del microteléfono. Para que un usuario móvil utilice el *WAP*, el operador inalámbrico, debe ser un celular o

PCS , necesarios para implementar el *WAP* en su sistema, como también asegurar que las unidades suscriptoras, que son los teléfonos, tengan capacidad de *WAP*.

El *WAP* es significativamente utilizado por los siguientes tipos de sistemas celular/*PCS*:

- *GSM-900, GSM-1800, GSM-1900*
- *CDMA IS-95*
- *TDMA IS-136*
- Sistemas 3G

Es importante ver que aunque *WAP* habilite a los usuarios para enviar y recibir texto, éste no requiere de un espectro adicional y es un servicio perfeccionado que puede y coexiste con las plataformas de tecnología 2G. *WAP* no es realmente un plataforma de 2.5G para entregar datos de manera inalámbricos a alta velocidad debido, fundamentalmente, al hecho de que usa plataformas de radio 2G para entregar el servicio y no tiene un ancho de banda 0. *WAP* incrementará la movilidad de muchos suscriptores y habilitará un *host* para aplicaciones de datos entregados para una mejora en el servicio de los suscriptores.

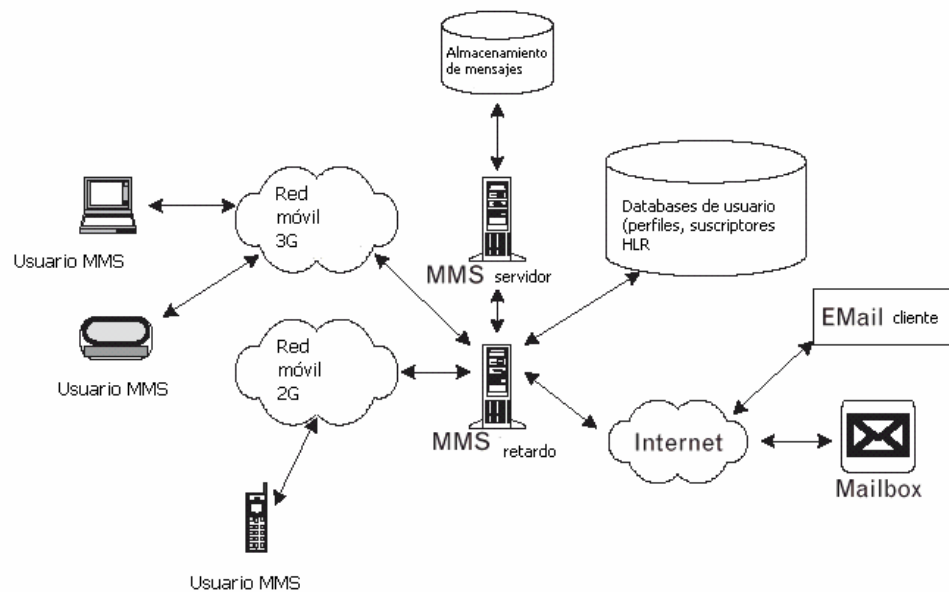
2.3.7.2. Mensajería y multimedia (*MMS*)

MMS incluye solamente servicios en tiempo no real. *MMS* incluye varios componentes de multimedia, tales como texto, imágenes, voz y video. Un mensaje *MMS* puede contener múltiples componentes, los cuales son combinados en la interface del usuario para producir una presentación en multimedia. Los componentes son llamados elementos de mensaje.

El carácter de tiempo no real de *MMS* es que se hacen muchas cosas más fácilmente en la red. El retardo en la transferencia de los datos no es un problema, es posible usar protocolos y técnicas que hagan que la transmisión de datos sea más eficiente con los recursos de la red. Los protocolos pueden usar paquetes de retransmisión, entrelazado largo, y otras técnicas similares que serían imposibles de usar en las aplicaciones en tiempo real por causa de los retardos causados por estos métodos.

La arquitectura del servicio de mensajería y multimedia se muestra en la figura 89.

Figura 89. Servicio *MMS*



FUENTE: Juha Coronen. **Introduction to 3G mobile communications**. Pág. 363

Se puede ver que *MMS* no tiene problemas al usarse en 3G; este servicio también puede ser proporcionado sobre una interface de aire 2G. Para ello, el caso de las limitaciones de capacidad de transmisión de datos en 2G y la capacidad de la terminal de usuario deben ser tomadas en consideración. La interface básica de aire *GSM* puede solamente proporcionar conexiones de circuito de conmutación a 14.4 Kbps, pero con la

combinación *EGDE + GPRS (EGPRS)*, es posible alcanzar tasa de transmisión de datos sobre los 100 Kbps. Esto proporciona una buena base para las aplicaciones de *MMS*, especialmente, en el servicio de *MMS* en tiempo no real.

El servidor *MMS* es una entidad de red que debe almacenar y procesar mensajes. Ésta puede usar una base datos separada del almacenamiento para mensajes. Por lo tanto, podría ser un servidor *MMS* separado para cada tipo de mensaje: e-mail, fax, y *MMS*. En la práctica, un servidor *MMS* puede ser combinado con un *MMS* relevador.

El *MMS* relevador es una entidad de red con una larga lista de funciones. Es una entidad central que conecta a agentes usuarios *MMS* a través de varias redes (2G, 3G, internet), a bases de datos, y servidores *MMS*.

La especificación 3GPP *MMS*, enuncia las siguientes funciones obligatorias para el relevador *MMS*:

- Recibir y enviar mensajes de multimedia.
- Supresión del mensaje *MMS* en base el perfil del usuario o la filtración de la información.
- Conversión de mensajes de multimedia en/de formatos soportados por sistemas de mensajería legados.
- Recuperación satisfactoria del mensaje.
- Notificación de mensaje al agente usuario *MMS*.
- Generación de entrega de reportes.
- Enrutamiento de mensajes de multimedia de envío y lectura del reporte de contestación.

- Garantiza que los mensajes no se pierdan, y lleguen exitosamente al otro elemento *MMSE*.
- Generación de archivos de carga de datos (*CDRs*).
- Negociación de las capacidades de las terminales.

2.3.7.3. Navegación en el internet

IP móvil (3G)

El *IP* móvil se considera como un método de transporte de paquetes, es totalmente diferente del *IP* simple que en la actualidad transporta los datos. El *IP* móvil utiliza una dirección de *IP* estática que puede ser asignada por el *PDSN*. El establecimiento de la dirección estática *IP* facilita el *ROAMING* durante la sesión de paquete, con tal de que las direcciones *IP* estáticas sean únicas, para una unidad suscriptora es demasiado ser singularmente identificada.

Con el *IP* móvil, el *PDSN* es el *agente extranjero (Foreign Agent FA)* y el *agente de casa (Home Agent HA)* es fijado como *HA* virtual. El móvil necesita registrar cada tiempo en el que inicia una sesión de paquete de datos, si ésta se está originando o terminando. También el *PDSN*, sobre la red visitada, termina la sesión del paquete mediante el uso de un túnel *IP* en *IP*. El *HA* entrega el tráfico de *IP* al *FA* a través de un túnel *IP*.

El móvil es el responsable de notificarle al sistema cuándo se ha movido a otra área de servicio. Una vez que el móvil se ha movido, necesita registrarse con otro *FA*. El *FA* asigna al móvil una *dirección de cuidado (care of address COA)*.

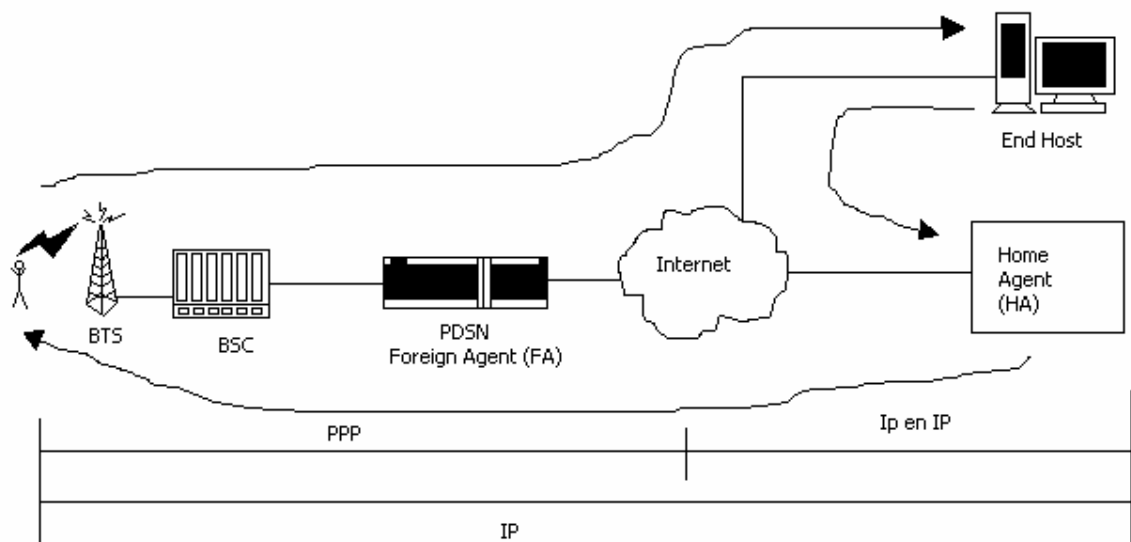
El *HA* envía los paquetes a la red visitada para la terminación en el móvil. El *HA* encapsula el paquete *IP* original destinado para el móvil usando el *COA*. El *FA* utiliza el túnel *IP* en *IP* para extraer el paquete original y enrutarlo hacia el móvil.

La dirección *IP* es asignada vía *DHCP* (*Dynamic Host Configuration Protocol*) y, a la vez, es trazada en el *HA*. En la dirección reversa, el enrutamiento de los paquetes *IP* ocurre en la misma red y no requiere de un túnel *IP* en *IP*, a menos de que el operador inalámbrico decida implementar un túnel *IP* reverso. En síntesis:

- El *PDSN* en las redes visitadas siempre termina en un túnel *IP* en *IP*.
- El *HA* entrega el tráfico *IP* a través del túnel móvil *IP* para el *FA*.
- El *FA* realiza el enrutamiento hacia el móvil y asigna la dirección *IP* para lo cual utiliza *DHCP*.

En la figura 90 se muestra un esquema simplificado de *IP* móvil.

Figura 90. *IP* móvil



3. MODELOS DE TRÁFICO TRADICIONALES DE VOZ

3.1. El proceso de *Poisson*

Una variable aleatoria X posee una **ley de distribución de probabilidades del tipo *Poisson*** cuando:

$$f(k) = P[X = k] = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.1)$$

Este tipo de leyes se aplica a sucesos con probabilidad muy baja de ocurrir, obteniéndose como la distribución límite de una sucesión de variables binomiales, $B(n, p)$, donde $n \cdot p = \lambda$, y $n \rightarrow \infty$ (por tanto, $p \rightarrow 0^+$).

$$\{X_n\}_{n=1}^{\infty}, \text{ donde } X_n \rightarrow B(n, p), \lambda = n \cdot p, \Rightarrow X_n \rightarrow X \rightarrow Poi(\lambda) \quad (3.2)$$

La demostración de lo anterior consiste en:

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} p[x_n = k] &= \lim_{n \rightarrow \infty} \binom{n}{k} p^k q^{n-k} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n!}{k!(n-k)!} \underbrace{\left(\frac{\lambda}{n}\right)^k}_{=p} \underbrace{\left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^{n-k}}_{=q} \end{aligned}$$

3.2. Distribución exponencial

La distribución exponencial es el equivalente continuo de la distribución geométrica discreta. Esta ley de distribución describe procesos en los que:

- Interesa saber el tiempo hasta que ocurre determinado evento, sabiendo que, el tiempo que pueda ocurrir desde cualquier instante dado t , hasta que ello ocurra en un instante t_f , no depende del tiempo transcurrido anteriormente en el que no ha pasado nada.

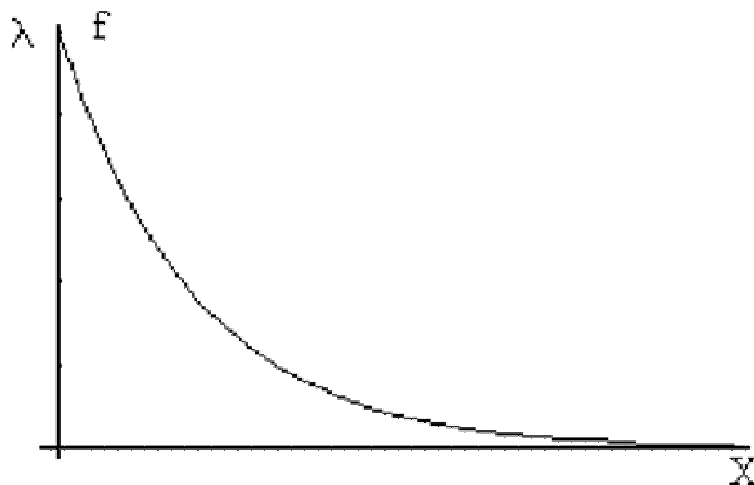
Si una variable aleatoria continua X , distribuida a lo largo de \mathfrak{R}^+ , es tal que su función de densidad es:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \text{ si } 0 < x$$

se dice que sigue una función exponencial de parámetro λ , $X \rightarrow \text{Exp}(\lambda)$.

En la figura 91 se muestra la gráfica de la función de densidad de una $\text{Exp}(\lambda)$.

Figura 91. Función de densidad, f , de una $\text{Exp}(\lambda)$



FUENTE: Comunicaciones de datos 2001. s.d.e.

Un cálculo inmediato dice que si $x > 0$:

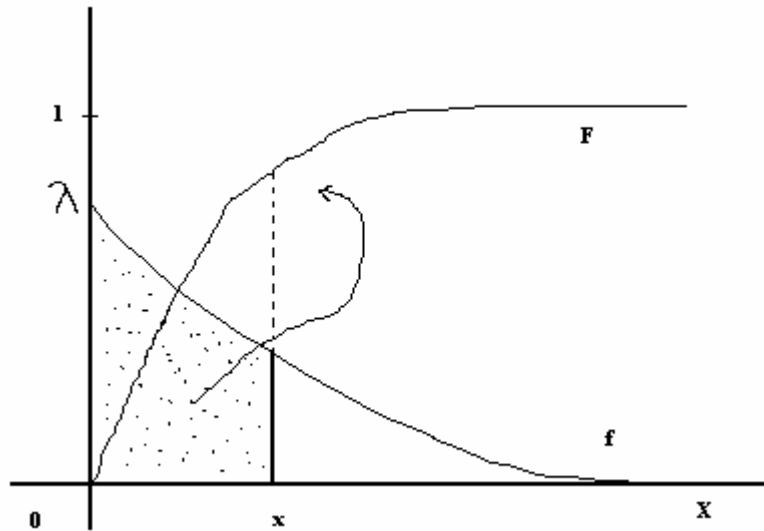
$$\int_0^x \lambda e^{-\lambda t} dt = -e^{-\lambda t} \Big|_0^x = 1 - e^{-\lambda x} \quad (3.5)$$

la función de distribución es:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x} & \text{Si } 0 < x \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

En la figura 92 se muestra la función de distribución, F , de $\text{Exp}(\lambda)$, calculada como el área que deja por debajo de sí la función de densidad.

Figura 92. Función de distribución F de $\text{Exp}(\lambda)$



FUENTE: Comunicaciones de datos 2001. s.d.e.

Para calcular el valor esperado y la varianza de la distribución exponencial, se obtiene en primer lugar la función característica:

$$\varphi_X(t) = \int_0^{+\infty} e^{itx} \lambda e^{-\lambda x} dx = \int_0^{+\infty} \lambda e^{(it-\lambda)x} dx = \frac{\lambda}{it-\lambda} e^{(it-\lambda)x} \Big|_0^{+\infty} = -\frac{\lambda}{it-\lambda}$$

derivando por primera vez, se obtiene lo siguiente:

$$\varphi_X'(t) = \frac{\lambda i}{(it-\lambda)^2}$$

$$E[X] = \frac{\varphi_X'(0)}{i} = \frac{1}{\lambda} \quad (3.6)$$

y derivando por segunda vez:

$$\varphi_X''(t) = \frac{-2\lambda i^2}{(it-\lambda)^3}$$

$$E[X^2] = \frac{\varphi_X''(0)}{i^2} = \frac{-2\lambda}{-\lambda^3} = \frac{2}{\lambda^2} \quad (3.7)$$

Entonces, la varianza vale:

$$\text{Var}[X] = E[X^2] - E[X]^2 = \frac{2}{\lambda^2} - \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 = \frac{1}{\lambda^2}$$

3.3. Modelos de tráfico según *erlang*

Definición de *erlang*

El producto del número de llamadas durante un período concreto y su tiempo medio de ocupación se define como volumen de tráfico. Si los abonados conectados a una central generan en una hora 300 llamadas de una duración media de 4 minutos, el volumen de tráfico será de 1200 minutos en el período indicado. Si el valor anterior se divide entre la duración total del volumen de tráfico considerado, se obtiene la intensidad del tráfico. Su unidad es el *erlang*, lo que da a entender que el valor de 1 *erlang* corresponde a la ocupación continua de un enlace. La intensidad de tráfico en ruta se interpreta como el número de circuitos ocupados simultáneamente.

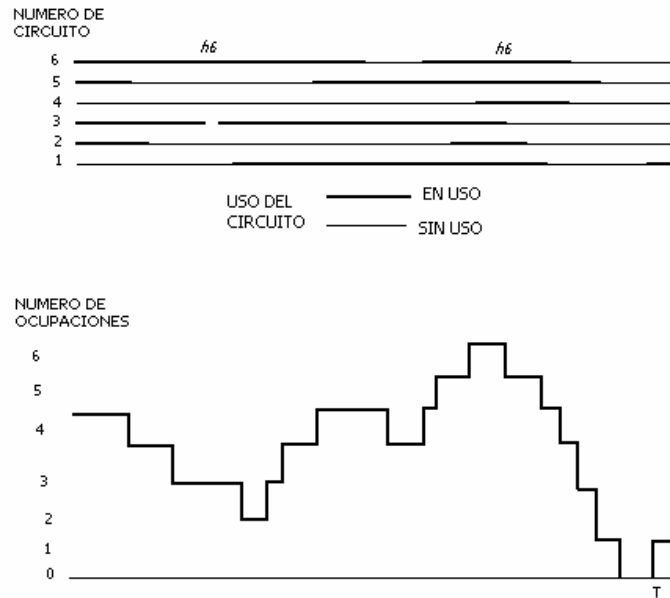
El análisis de las unidades de tráfico ayuda a mejorar las estructuras de red, para que puedan ofrecer una mejor calidad. Para el cálculo de una central se estudian las variaciones de tráfico a lo largo del año, en donde el número de llamadas durante la hora de mayor tráfico se llama la hora cargada (hora pico). Una central se considerará bien establecida cuando pueda atender el tráfico de la hora cargada (hora pico).

3.3.1. Número de ocupaciones simultáneas y número de *erlang*

Si se considera un dispositivo de conmutación por separado, se comprende fácilmente que la ocupación de éste es de cuántas llamadas recibe y cuánto tiempo ocupa cada llamada de este dispositivo.

Ahora se considera a un grupo de dispositivos donde cada uno sólo puede atender una llamada a la vez, entendiendo que el número de dispositivos ocupados puede variar tal como se muestra en la figura 93.

Figura 93. Variación en la ocupación de dispositivos



FUENTE: **Comunicaciones de datos 2001**. s.d.e.

El trabajo total llevado a cabo por el grupo, según el intervalo considerado puede expresarse como:

$$x\bar{h} = \sum_{j=1}^x h_j \quad (3.8)$$

Si se manejan x llamadas en el intervalo, donde \bar{h} es el promedio de todas las h y sea T la duración del intervalo considerado, entonces:

$$\frac{1}{T} \sum_{j=1}^x h_j \quad (3.9)$$

Indica el número promedio de ocupaciones, lo que también puede expresarse como:

$$\frac{x\bar{h}}{T} \quad (3.10)$$

Si:

$$y = \frac{x}{T} \quad (3.11)$$

Es el número de llamadas por unidad de tiempo, en consecuencia, se puede escribir lo siguiente:

$$A = y\bar{h} \quad (3.12)$$

Que es el número de ocupaciones simultáneas en el intervalo (0,T) y que corresponde precisamente a lo definido como intensidad o densidad de tráfico, el que con frecuencia es llamado simplemente tráfico.

Consecuentemente, el número de *erlangs* es simplemente el número promedio de ocupaciones simultáneas para un tiempo interno definido. El número de *erlangs* (A) se calcula de la siguiente manera:

$$A = yh \quad (3.13)$$

Donde:

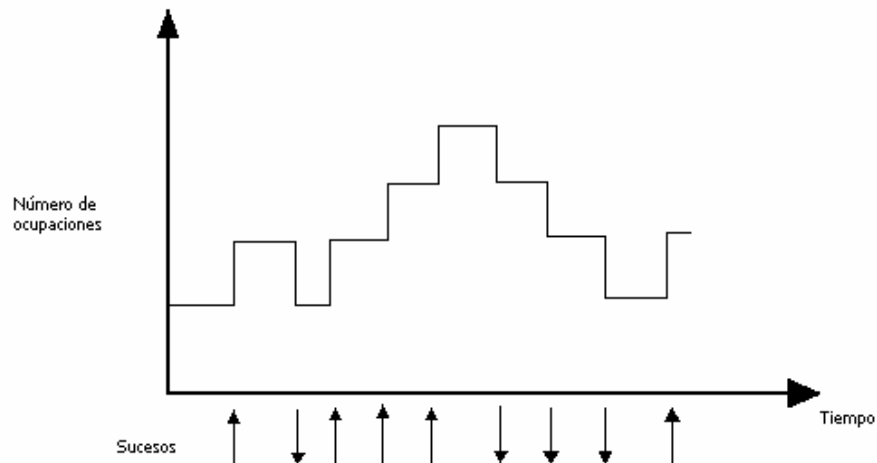
y = al número de llamadas por unidad de tiempo o al número de nuevas ocupaciones por unidad de tiempo.

h = al promedio de duración de estas ocupaciones, expresado en la misma unidad de tiempo.

3.3.2. Primera fórmula de *erlang* (*Erlang B*)

Si se considera un grupo de circuitos durante un cierto intervalo, el número de ocupaciones puede cambiar tal como se describe en la figura 94.

Figura 94. Número de ocupaciones cambiantes con el tiempo, determinadas por eventos acaecidos (Llamadas \uparrow , terminación \downarrow).



FUENTE: **Comunicaciones de datos 2001**. s.d.e.

El proceso anterior puede o no estar en equilibrio. Sin embargo, para decir que un proceso de tráfico está en equilibrio estadístico se debe asumir que:

- El proceso no se incrementa ni disminuye con el tiempo;
- El proceso se inició hace tanto tiempo, que la manera en que comenzó es ahora irrelevante para sus variaciones actuales.

3.3.2.1. Deducción de probabilidades de estado

Para ver la manera en la cual pueden deducirse las probabilidades de estado para un proceso de tráfico, se hacen los siguientes supuestos:

- Grupo de accesibilidad total con n dispositivos.
- Intensidad de llamada y cuando $p < n$ y cero cuando $p = n$, es decir, la intensidad de llamadas es independiente del número de ocupaciones en el grupo y las llamadas rechazadas no cambian la intensidad de llamada, lo cual implica que no hay intentos repetidos.
- Los tiempos de ocupación están exponencialmente distribuidos con una media de h .
- El proceso está en equilibrio estadístico.

Los supuestos se aplican al grupo de disponibilidad total del tipo *Poisson-Erlang*, ya que el equilibrio estadístico implica: INCREMENTO = DISMINUCIÓN.

A la larga se aplica:

$$\lambda_{p-1}(p-1) = \mu_p(p) \quad (3.14)$$

Donde:

$$\lambda_{p-1} = W(p-1)y \quad (3.15)$$

$$\mu_p = \frac{p}{h} \quad (3.16)$$

Si se considera a un grupo de disponibilidad total, se puede escribir lo siguiente:

$$W(p) = 1 \text{ para } 0 \leq p < n$$

$$W(p) = 0 \text{ para } p = n$$

Entonces se tiene que:

$$y(p-1) = \frac{p}{h}(p) \quad (3.17)$$

Para $p = 1, 2, 3, \dots, n$

Introduciendo: $A = yh$, se puede escribir:

$$A[p-1] = p \cdot [p] \quad (3.18)$$

Lo que significa:

$$A(0) = (1)$$

$$A(1) = 2(2)$$

$$A(2) = 3(3)$$

$$A(p-1) = p(p)$$

$$A(n-1) = n(n)$$

Por lo que cualquier probabilidad de estado puede expresarse en probabilidad de estado vecino y, por lo tanto, se pueden hacer cálculos recurrentes de cualquier (p) al estado (0), esto es:

$$\begin{aligned}
 (1) &= A(0) \\
 (2) &= \frac{A}{3} \cdot \frac{A}{2} \cdot A \cdot (0) \\
 (3) &= \frac{A}{3} \cdot \frac{A}{2} \cdot A \cdot (0)
 \end{aligned}$$

Esto es:

$$(p) = \frac{A^p}{p!} (0) \quad (3.19)$$

Donde $p! = p(p-1)(p-2)\dots 2 \cdot 1$

De acuerdo con la definición de probabilidades,

$$\sum_{p=0}^n (p) = 1 \quad (3.20)$$

La suma de todas las probabilidades de estado es igual a la unidad, por lo tanto:

$$\sum_{p=0}^n \frac{A^p}{p!} (0) = 1 \quad (3.21)$$

Si se define $p! = 0$ para $p = 0$,

$$(0) \left(1 + A + \frac{A^2}{2} + \dots + \frac{A^n}{n!} \right) = 1$$

Se puede escribir entonces la siguiente expresión:

$$(p) = \frac{\frac{A^p}{p!}}{\sum_{v=0}^n \frac{A^v}{v!}} \quad (3.22)$$

Donde $p = n$ da la primera fórmula de *erlang*.

El *Erlang B* es una fórmula de ingeniería de tráfico telefónico. Se utiliza cuando el tráfico telefónico es aleatorio y se pierden las colas, el *Erlang B* asume el bloqueo de llamadas y las distribuye automáticamente hacia otra ruta, esto hace desaparecer el bloqueo.

La primera fórmula de *erlang* es ocupada si se cumplen completamente las siguientes cuatro condiciones:

- Si se producen pérdidas de sistema, en el caso de que una llamada falle a causa de congestión es desconectada y no hay segundo intento de llamada, asumiendo que el usuario no hará un nuevo intento de llamada, contrariamente a lo que normalmente se realiza.
- Accesibilidad plena, lo que involucra que cualquier entrada libre pueda alcanzar alguna salida libre.
- Tráfico aleatorio, esto está referido a que el tiempo entre dos llamadas puede variar en forma aleatoria.

- Gran número de fuentes de llamadas, sin importar si hay pocas o muchas llamadas, debe ser aproximadamente constante, refiriéndose al mismo valor promedio. Lo anterior equivale matemáticamente a referirse a un número infinito de fuentes de llamadas.

Para la proporción de llamadas perdidas en un grupo de disponibilidad total, incluyendo n dispositivos ya arreglados, de tal manera que cualquier llamada que no encuentra un dispositivo libre se pierda, la fórmula de *Erlang B*, está dada por la siguiente ecuación:

$$E(A) = \frac{\frac{A^n}{n!}}{\sum_{r=0}^n \frac{A^r}{r!}} \quad (3.23)$$

Esta ecuación conocida como *Erlang B*, donde E representa la probabilidad de pérdida de una llamada y A es el flujo de tráfico ofrecido expresado en *erlang*.

Esta fórmula es frecuentemente usada en la estimación del número de dispositivos dependientes de tráfico requeridos en plantas telefónicas. No sólo es usada para grupos de disponibilidad total sino también, en gran medida, como base para la estimación de las condiciones de tráfico en grupos con disponibilidad restringida. Con una probabilidad de bloqueo definida por P_b : si el tráfico ofrecido es A con N servidores (canales), el tráfico sin bloqueo es $A(1 - P_b)$, y el tráfico con bloqueo es $A(P_b)$. Entonces también es utilizado el modelo de *Erlang B* para estimar el número de líneas (servidores) requeridos para conexiones (troncales *CO*) o para conexiones de líneas privadas.

La relación entre el número de dispositivos n , el flujo de tráfico A y la cantidad de $E(A)$, involucra trabajo de cálculos numéricos y se necesita la ayuda de tablas, en la tabla XIII se dan a conocer dichos valores.

Tabla XIII. Tabla de bloqueo Erlang B

N	Tráfico ofrecido (erlang)												
	1%	1.2%	1.5%	2%	3%	5%	7%	10%	15%	20%	30%	40%	50%
1	0.101	0.012	0.015	0.020	0.030	0.052	0.075	0.111	0.176	0.250	0.429	0.667	1.00
2	0.153	0.168	0.19	0.223	0.282	381	0.470	0.595	0.796	1.00	1.44	2.00	2.73
3	0.455	0.489	0.535	0.602	0.715	0.899	1.05	1.27	1.60	192	2.63	3.47	4.59
4	0.809	0.922	0.992	1.09	1.25	1.52	1.74	2.04	2.50	2.94	3.89	3.02	6.50
5	1.36	1.43	1.52	1.65	1.87	2.21	2.50	2.88	3.45	4.01	5.18	6.59	8.43
6	1.9	1.99	2.11	2.27	2.54	2.96	3.30	3.75	4.44	5.10	6.51	8.19	10.3
7	2.50	2.60	2.74	2.93	3.24	3.73	4.13	4.66	5.46	6.23	7.85	9.79	12.3
8	3.12	3.24	3.4	3.62	3.98	4.54	4.99	5.59	6.49	7.36	9.21	11.4	14.3
9	3.78	3.91	4.09	4.34	4.74	5.37	5.87	6.54	7.55	8.52	10.5	13.0	16.2
10	4.46	4.61	4.8	5.08	5.52	6.21	6.77	7.51	8.61	9.68	11.9	14.6	18.2
11	5.15	5.32	5.53	5.84	6.32	7.07	7.68	8.48	9.69	10.8	13.3	16.3	20.2
12	5.87	6.05	6.28	6.61	7.14	7.94	8.60	9.47	10.7	12.0	14.7	17.9	22.2
13	6.6	6.79	7.04	7.40	7.96	8.83	9.54	10.4	11.8	13.2	16.1	19.5	24.2
14	7.35	7.55	7.82	8.20	8.80	9.72	10.4	11.4	12.9	14.4	17.5	21.2	26.2
15	8.10	8.32	8.61	9.00	9.64	10.6	11.4	12.4	14.0	15.6	18.8	22.8	28.2
16	8.87	9.10	9.40	9.82	10.5	11.5	12.3	13.5	15.1	16.8	20.2	24.5	30.1
17	9.65	9.89	10.2	10.6	11.3	12.4	13.3	14.5	16.2	18.0	21.7	26.1	32.1
18	10.4	10.6	11.0	11.4	12.2	13.3	14.3	15.5	17.4	19.2	23.1	27.8	34.1
19	11.2	11.4	11.8	12.3	13.1	14.3	15.2	16.5	18.5	20.4	24.5	29.4	36.1
20	12.0	12.3	12.6	13.1	13.9	15.2	16.2	17.6	19.6	21.6	25.9	31.1	38.1

FUENTE: Comunicaciones de datos 2001. s.d.e.

3.3.2.2. Ingeniería de tráfico Erlang B

Para diferentes tecnologías, la interpretación de la capacidad en *erlang* podría ser diferente. En los tipos de sistemas *AMPS* y *TDMA*, para un esquema de distribución de canal fijo, el total de voz en *erlangs* puede ser calculado directamente basándose en la tabla de bloqueo *Erlang B* y en el número de canales asignados.

En un esquema de distribución de canal dinámico, existe una troncal extra eficiente, la cual puede utilizar la tabla de *Erlang B* basada en un número alto de canales

(esto implicala ocupación de la troncal alta). La eficiencia de la troncal depende de los modelos de tráfico real y demandas dentro del sistema.

En *CDMA*, puesto que la capacidad no es fija, no es apropiado el modelo de *Erlang B* para decidir la capacidad de voz en *erlangs*. Incluso la tabla de *Erlang B* es todavía utilizada para propósitos de dimensionamiento. El concepto de capacidad frente al de cobertura debería también ser considerado.

3.3.2.3. Ejemplo de capacidad de *Erlang B*

Dentro de un ancho de banda total de 25 MHz (enlace directo más enlace reverso), las tecnologías *AMPS*, *TDMA*, *GSM* y *CDMA* tienen las siguientes capacidades en *erlangs*:

- *AMPS*: canales por celda: $56 (56.4) = 396/7$. Con un factor de reutilización de 7 los canales totales de tráfico son 395. A un bloqueo del 2%, la capacidad en *erlangs* es: 45.9.
- *TDMA*: canales por celda: $175 = 1227/7$. Con un factor de reutilización de 7 los canales totales de tráfico son 1227. A un bloqueo del 2%, la capacidad en *erlangs* es: 159.
- *GSM*: canales por celda: $124 = 992/(4*2)$. Con un factor de reutilización de 4 los canales totales de tráfico son 992 (dentro de 50 MHz). A un bloqueo del 2%, la capacidad en *erlangs* es: 113.2.
- *CDMA*: canales por celda (10 portadoras): 120 (por sector). A un bloqueo del 2%, la capacidad en *erlangs* es: $322.2 = 107.4 (erlangs \text{ por sector}) * 3$.

3.3.3. Sistema con memoria o retardo

Son aquellos en que las llamadas que no pueden ser establecidas inmediatamente, son incorporadas a una cola de alguna manera específica (orden de llegada, aleatoriamente, etc.) y son cursadas de esa manera cuando los circuitos están disponibles.

Para estos sistemas se emplea el análisis de sistemas con colas. El modelo del sistema se divide en tres partes:

- El proceso de entrada, que describe la manera en que se hacen las demandas sobre el sistema.
- El comportamiento de la cola, que describe la manera en que la llamada o el mensaje llega y abandona la cola.
- El mecanismo de servicio del sistema, esto es cómo el servidor responde las demandas.

3.3.4. Segunda fórmula de *erlang* (*Erlang C*)

Es usada cuando el tráfico es aleatorio y se mantienen las colas. Asume todas las llamadas reteniéndolas hasta que una línea este disponible.

Puede ser usada para determinar los recursos necesarios en cualquier situación en la que hay gente que espera para ser atendida. Para los propósitos de un centro de llamadas, *Erlang C* calcula los tiempos de espera predecidos, basado en tres aspectos:

- Número de agentes.
- Número de personas que esperan que su llamada sea atendida.
- Tiempo promedio que lleva para atender cada llamada.

También puede predecir los recursos requeridos para mantener los tiempos de espera dentro de los parámetros establecidos, lo cual resulta muy útil para los centros de llamadas receptores. Dando entonces la probabilidad de que una llamada tenga retraso:

$$P_d = \frac{A^N}{A^N + N! \left(1 - \frac{A}{N}\right) \sum_{K=0}^{N-1} A^K / K!} \quad (3.24)$$

La probabilidad de que una señal mandada a la cola tenga que esperar más de un tiempo especificado t , viene dada por:

$$P(w > t) = e^{-\left(\frac{N-A}{H}t\right)} \quad (3.25)$$

donde H es el tiempo medio de duración de una llamada.

La probabilidad de que una llamada entre en la cola y se retrase más de un tiempo t , viene dada por el producto de las probabilidades:

$$P(w > t) = P_d \cdot e^{-\left(\frac{N-A}{H}t\right)} \quad (3.26)$$

4. ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE TRÁFICO DE VOZ Y DE DATOS SOBRE UNA RED CELULAR CDMA

4.1. Asignación de canales en una red *CDMA*

La asignación de un canal en una red celular *CDMA*, depende del tipo de llamada que se realice.

4.1.1. Codificación de canal directo en *CDMA2000*

El esquema de modulación directa en *CDMA2000* tiene por separado en fase y en cuadratura el flujo de bits contrario a *CDMAOne*, donde estas dos se combinan en la fase final de ganancia del proceso. Esto da a *CDMA2000* un factor automático de 2 en la capacidad de tasa de bits a causa del gasto de un factor de 2 en el proceso de ganancia.

CDMA2000 soporta dos tipos de canales de tráfico, un **canal fundamental** y un **canal suplementario**. El canal fundamental es usado para llamadas de voz y para una baja tasa de bits de señalización durante una llamada de datos, se utilizan las mismas tasas como en *CDMAOne* de 9.6 Kbps *RS1* y de 14.4 Kbps *RS2*.

Los canales suplementarios pueden ser dedicados a una simple terminal de usuario o compartidos por usuarios en modo de paquetes múltiples. Cada usuario de un canal suplementario debe tener activo un canal fundamental que no podría ser nada más para el control de la potencia y de una baja tasa de bits de señalización, se divide éste en un octavo de la tasa y en un octavo de la potencia. Los canales suplementarios directos son controlados por el proveedor de servicio inalámbrico, para que los suscriptores puedan

compartir canales suplementarios fijos en modo de paquete, o puedan tener sus propios canales suplementarios, uno o más en el mismo enlace directo. En la dirección directa, la estación base hace la programación del paquete y dice a las terminales de usuario cuáles *slots* de tiempo son asignados a ellos.

4.1.2. Codificación de canal reverso en CDMA2000

En contraste con *CDMAOne*, el enlace reverso en *CDMA2000* soporta múltiples canales para una terminal simple de usuario. El canal reverso permite la demodulación coherente en la estación base y la medida más exacta para el control de la potencia y filtrado. Los canales inversos múltiples de un enlace *CDMA2000* son expandidos con códigos *Walsh* ortogonales que los mantienen separados. El canal piloto usa un código *Walsh* de ceros, el canal dedicado al control usa 8 chips de código *Walsh*, el canal fundamental usa 4 chips de código *Walsh*, y los canales suplementarios usan 2 bits de código *Walsh* para permitir altas tasas de bits en entornos favorables. Puesto que la terminal de usuario envía menos canales que la estación base, el enlace reverso puede usar códigos *Walsh* cortos para mantener la ortogonalidad entre sus canales separados.

Al igual que en la codificación directa, el canal fundamental también es usado para llamadas de voz y para tasas bajas de bits de señalización durante una llamada de datos. Los canales suplementarios pueden ser dedicados o compartidos, al igual que en la dirección directa (o enlace directo). Un enlace simple puede tener solamente un canal fundamental, o puede tener uno o más canales suplementarios juntos con la tasa baja de bits y el canal fundamental. Cuando un simple canal suplementario reverso es compartido entre varias terminales de usuario, la programación es manipulada por un protocolo de control de acceso al medio (*MAC*), las terminales de usuario envían mensajes *MAC* a través de sus propios canales dedicados de control y obtienen una confirmación antes de que utilicen un canal de datos de paquete suplementario compartido.

4.1.3. Estimación de la capacidad de radio en CDMA

Existen varias variables que determinan la capacidad de la portadora en CDMA. Los valores de estas variables utilizados en el análisis de capacidad, se muestran en la tabla XIV.

Tabla XIV. Parámetros de capacidad de CDMA

		Dirección	W , Mchps	R , Kbits	E_b/N_o , dB	d , dB	f	g	h	p	v	s	j	m
cdmaOne		Directo	1.2288	9.6	5.0	1.0	0.5	0.3	0.1	0.6	0.4	0.8	0.0	0.3
cdmaOne		Reverso	1.2288	9.6	7.5	1.0	0.5	0.3	0.0	0.8	0.4		1.0	0.3
cdma2000	voz	Directo	1.2288	9.6	4.5	1.0	0.5	0.3	0.1	0.9	0.4	0.8	0.0	0.3
cdma2000	voz	Reverso	1.2288	9.6	4.5	1.0	0.5	0.3	0.2	0.8	0.4		1.0	0.3
cdma2000	datos	Directo	1.2288	160.0	9.0	0.5	0.5	0.3	0.0	0.9	0.2	0.8	0.0	0.3
cdma2000	datos	Reverso	1.2288	160.0	9.0	0.5	0.5	0.3	0.0	0.8	0.2		1.0	0.3
W-CDMA	voz	Directo	3.84	4.8	4.5	1.0	0.5	0.3	0.3	0.9	0.6	0.8	0.0	0.4
W-CDMA	voz	Reverso	3.84	4.8	4.5	1.0	0.5	0.3	0.2	0.9	0.6		1.0	0.4
W-CDMA	datos	Directo	3.84	160.0	9.0	0.5	0.5	0.3	0.0	0.9	0.2	0.8	0.0	0.4
W-CDMA	datos	Reverso	3.84	160.0	9.0	0.5	0.5	0.3	0.0	0.9	0.2		1.0	0.4
TD-SCDMA	voz	Directo	1.28	8.0	4.5	1.0	2.0	0.3	0.1	0.7	0.6	0.0	0.0	0.3
TD-SCDMA	voz	Reverso	1.28	8.0	4.5	1.0	1.0	0.3	0.1	0.5	0.6		0.8	0.3
TD-SCDMA	datos	Directo	1.28	160.0	9.0	0.5	2.0	0.3	0.0	0.7	0.2	0.0	0.0	0.3
TD-SCDMA	datos	Reverso	1.28	160.0	9.0	0.5	1.0	0.3	0.0	0.5	0.2		0.8	0.3

FUENTE: Adam Rosenberg , Sid Kemp. **CDMA Capacity and Quality Optimization**. Pág. 138

Donde:

- W es la tasa de chips.
- R es la tasa de información de datos.
- E_b/N_o es la energía por bit dividida por el nivel de ruido, en CDMA es equivalente a la relación S/N.
- d es el efecto de distorsión Doppler y cualquier otra distorsión debida al movimiento, una llamada estacionaria tiene una $d = 0$ dB y una llamada de un carro en movimiento tiene una $d = 0.2$ dB.
- f es la contribución de interferencia de otras celdas relativas a la portadora sobre el sector de celda de servicio.

- g es la contribución de interferencia de otros sectores de la misma celda relativa a la portadora sobre el sector de servicio.
- h está activa para piloto y control de potencia relativo a la portadora sobre el sector de servicio.
- p es el efecto de los retardos de control de potencia y errores, de modo que para un perfecto control de potencia $p = 0$ dB ($p = 1$), y para valores menos que 1 refleja menos desempeño.
- v es el factor de actividad de voz, para $v = 1$ representa los canales que siempre están, y $v = 2/3$ representa canales que están impulsados fuera de un tercio del tiempo.
- s es el efecto del *handoff* de *soft* y *softer* en la dirección directa, contando cada antena de servicio extra, para un sistema con la mitad de tráfico servido por dos celdas, tiene un $s = 1/2$; para un sistema con la mitad de tráfico servido por tres celdas, tiene un $s = 3/4$.
- j es la ortogonalidad o el efecto de detección de conexión (*joint-detection JD*), para un *CDMA* de portadora incorrelacionada $j = 0$, para una portadora ortogonal tiene un $j = 1$, y un sistema que utiliza detección de conexión (*JD*) tiene un $j = 0.8$ ($j = -1$ dB).
- m es la contribución de los tiempos multifase de los lóbulos laterales relativos a la portadora sobre el sector de celda de servicio, para $m = 0$ no tiene interferencia multifase y para $m = 0.4$ es significativo el tiempo de interferencia del lóbulo lateral.

Las fórmulas generales para el cálculo de la capacidad son las siguientes:

$$Capacidad_{directa} = \frac{W/R}{E_b/N_o} \frac{p}{dv(1+s)} \frac{1}{(j+f+g)(1+h)+m} + j \quad (\text{erlangs}) \quad (4.1)$$

$$Capacidad_{reversa} = \frac{W/R}{E_b/N_o} \frac{p}{dv} \frac{1}{(j+f+g)(1+h)} + j(1+h) - m \quad (\text{erlangs}) \quad (4.2)$$

La tasa de bits R y el valor de E_b/N_o son valores de información de la tasa, antes que la corrección de error de transmisión (FEC) sea agregada. Utilizando el canal de voz de *CDMAOne* con una tasa de bits de información de 9.6 Kbps como un ejemplo. Una tasa de $\frac{1}{2}$ FEC trae un total de 19.2 Kbps, y que el FEC del tren de bits codificado requiere de una E_b/N_o de 2 dB para mantener una tasa de error de bit suficiente (*bit error rate BER*). Esto es equivalente a una tasa de bits de 9.6 Kbps con una E_b/N_o de 5 dB. Los 3 dB extras es el factor de 2 en la tasa $\frac{1}{2}$ FEC . Se puede ver a R y E_b/N_o de cualquier punto de vista de información ($R = 9.6$, $E_b/N_o = 5$ dB) o del punto de vista de codificación FEC ($R = 19.2$, $E_b/N_o = 2$ dB). En estas dos maneras iguales de mirar el mismo canal, los recursos de *CDMA* utilizados son los mismos en cualquiera de las dos formas. Para los cálculos anteriores se utilizó el punto de vista de la información.

4.2. Modelos de tráfico en *CDMA2000*

La capacidad para una celda *CDMA2000* está determinada a través de la interacción de diversos parámetros y es conducida por la parte de acceso a radio del sistema, con tal de que las redes fijas tengan el número total de módulos para cada plataforma. Los parámetros para la determinación de la carga de tráfico para un sitio *CDMA2000* son similares a los usados en el sistema *IS-95* con la excepción de que *CDMA2000* introduce un paquete de datos y la inclusión del código *Walsh* 128/256 para mencionar uno de los pocos problemas previos de cobertura.

Con las estaciones base de *IS-95*, el uso de elementos de tarjeta es esencial para la manipulación de tráfico si éste es para voz o datos. El resultado deseado de la ingeniería de tráfico para una estación base *CDMA2000* es que sea capaz de determinar la cantidad de elementos de canal y tarjetas requeridos para soportar el tráfico esperado. Otro factor que encaja dentro de los cálculos de tráfico para el sistema es el involucramiento de ruido.

La capacidad de polo para un sistema *CDMA* es el máximo número teórico de usuarios simultáneos que pueden coexistir en una simple portadora *CDMA*. Sin embargo, el polo del sistema se pondría inestable y, por consiguiente, operaría a menos del 100% de su capacidad que, es el método deseado de operación. Típicamente el diseño es para el 50 por ciento de la capacidad del polo para el sitio.

Los canales de tráfico actual para una celda están determinados a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Canales de tráfico actuales} = (\text{canales de tráfico efectivos} + \text{canales de handoff soft})$$

La máxima capacidad para una celda *CDMA* debería ser del 75% del límite teórico.

4.2.1. Códigos *Walsh*

Con la introducción de *CDMA2000*, hay varias alteraciones en el uso de los códigos *Walsh*. En *CDMA2000*, los códigos *Walsh* tienen ahora longitud variable del rango de 4 a un total de 256, el cual es una expansión sobre los sistemas *IS-95* que solamente tenían 64 códigos. El primer efecto con la utilización de los códigos *Walsh* de longitud variable es que si un código *Walsh* corto es utilizado, éste evita el empleo de códigos *Walsh* largos que son derivados de éste mismo.

La tabla XV ayuda a establecer la relación entre cual longitud de código *Walsh* está asociada con una tasa particular de datos.

Tabla XV. Códigos Walsh en CDMA2000

Rama de códigos Walsh								
	RC	256	128	64	32	16	8	4
SR1	1	Na	Na	9.6	Na	Na	Na	Na
	2	Na	Na	14.4	Na	Na	Na	Na
	3	Na	Na	9.6	19.2	38.4	76.8	153.6
	4	Na	9.6	19.2	38.4	76.8	153.6	307.2
	5	Na	Na	14.4	28.8	57.6	115.2	230.4
SR3	6		9.6	19.2	38.4	76.8	153.6	307.2
	7	9.6	19.2	38.4	76.8	153.6	307.2	614.4
	8		14.4	28.8	57.6	115.2	230.4	460.8
	9	14.4	28.8	57.6	115.2	230.4	460.8	1036.8

FUENTE: Clint Smith, P.E., Daniel Collins. **3G Wireless Networks**. Pág. 518

Para una *SRI* y *RCI* hay un máximo número de usuarios que tiene códigos *Walsh* individuales iguales a 64.

4.2.2. Tasas de paquete de datos

Como parte de los aspectos de diseño, se tiene que ver la relación entre la tasa de datos y los otros componentes que son afectados por la opción de datos y la velocidad de éstos. En la tabla XVI se muestran los factores envueltos en la capacidad del sistema. El asterisco se refiere a que hay un piloto inverso involucrado con esas configuraciones de *CDMA2000*.

Tabla XVI. Tasa de paquete de datos

Directo			
RC	SR	Tasas de datos	Características
1	1	1200, 2400, 4800, 9600	R = ½
2	1	1800, 3600, 7200, 14400	R = ½
3	1	1500, 2700, 4800, 9600, 38400, 76800, 153600	R = ¼
4	1	1500, 2700, 4800, 9600, 38400, 76800, 153600, 307200	R = ½
5	1	1800, 3600, 7200, 14400, 28800, 57600, 115200, 230400	R = ¼
6	3	1500, 2700, 4800, 9600, 38400, 76800, 153600, 307200	R = 1/6
7	3	1500, 2700, 4800, 9600, 38400, 76800, 153600, 307200, 614400	R = 1/3
8	3	1800, 3600, 7200, 14400, 28800, 57600, 115200, 230400, 460800	R = ¼ (20ms) R = 1/3 (5ms)
9	3	1800, 3600, 7200, 14400, 28800, 57600, 115200, 230400, 460800, 1036800	R = ½ (20ms) R = 1/3 (5ms)

Reverso			
RC	SR	Tasas de datos	Características
1	1	1200, 2400, 4800, 9600	R = 1/3
2	1	1800, 3600, 7200, 14400	R = ½
3*	1	1200, 1350, 1500, 2400, 2700, 4800, 9600, 19200, 38400, 76800, 153600, 307200	R = ¼ R = ½ para 307200
4*	1	1800, 3600, 7200, 14400, 28800, 57600, 115200, 230400,	R = ¼
5*	3	1200, 1350, 1500, 2400, 2700, 4800, 9600, 19200, 38400, 76800, 153600, 307200, 614400	R = ¼ R = ½ para 307200 y 614400
6*	3	1800, 3600, 7200, 14400, 28800, 57600, 115200, 230400, 460800, 1036800	R = ¼ R = ½ para 1036800

En la tabla XVII se muestra la relación entre las tasas de datos definidas en Kbps, y el proceso de ganancia.

Tabla XVII. Tasa de datos e interacción con el proceso de ganancia

Enlace reverso											
RC1		RC2		RC3		RC4		RC5		RC6	
Kbps	PG	Kbps	PG	Kbps	PG	Kbps	PG	Kbps	PG	Kbps	PG
9.6	128	14.4	85.33	9.6	128	14.4	85.33	9.6	384	14.4	256
				19.2	64	28.1	42.67	19.2	192	28.1	128
				38.4	32	57.6	21.33	38.4	96	57.6	64
				76.8	16	115.2	10.67	76.8	48	115.2	32
				153.6	8	230.4	5.33	153.6	24	230.4	16
				307.2	4			307.2	12	460.8	8
								614.4	6	1036.8	4
Enlace directo											
RC1		RC2		RC3		RC4		RC5		RC6	
Kbps	PG	Kbps	PG	Kbps	PG	Kbps	PG	Kbps	PG	Kbps	PG
9.6	128	14.4	85.33	9.6	128	9.6	128	14.4	85.33	9.6	384
				19.2	64	19.2	64	28.1	42.67	19.2	192
				38.4	32	38.4	32	57.6	21.33	38.4	96
				76.8	16	76.8	16	115.2	10.67	76.8	48
						153.6	8	230.4	5.33	153.6	24
						307.2	4			307.2	12
RC7		RC8		RC9							
Kbps	PG	Kbps	PG	Kbps	PG						
9.6	384	14.4	256	14.4	256						
19.2	192	28.1	128	28.1	128						
38.4	96	57.6	64	57.6	64						
76.8	48	115.2	32	115.2	32						
153.6	24	230.4	16	230.4	16						
307.2	12	460.8	8	460.8	8						
614.4	6			1036.8	4						

FUENTE: Clint Smith, P.E., Daniel Collins. **3G Wireless Networks**. Pág. 528

Para determinar el número relativo de usuarios que utilizan un simple canal *CDMA*, se emplea la siguiente ecuación:

$$N = \frac{[W/R]}{\alpha[E_b/N_o][1+\beta]} + 1 \quad (4.3)$$

donde:

W/R = Ganancia de proceso

α = factor de actividad = 0.479 para voz y 1.0 para datos (generalmente)

$$E_b/N_o = 7$$

$\beta = 0.6$ (omni) y 0.85 (sector).

4.3. Asignación de canales para una llamada de datos

4.3.1. Características de los datos

Los diferentes servicios de datos tienen diferentes características, entre éstas se pueden mencionar las siguientes:

- Búsqueda web, email.
- Altas demandas de tráfico de datos en servicios.
- Modelos de tráfico asimétrico en ambos enlaces, tanto en el enlace directo, como en el enlace reverso.

Servicios de descarga tales como:

- Diferentes *QoS* en *BER*, *FER*, y en *Jitter delay*.

En la mayoría de los casos, no es necesario que haya una larga duración (en segundos) para un canal dedicado para cada aplicación de datos, debido a lo siguiente:

- Las interacciones de datos no es necesario que se realicen en tiempo real, debido a que las tramas de datos con error pueden ser retransmitidas después del tren de datos.
- Los canales de altas tasas de datos son usualmente compartidos entre usuarios.

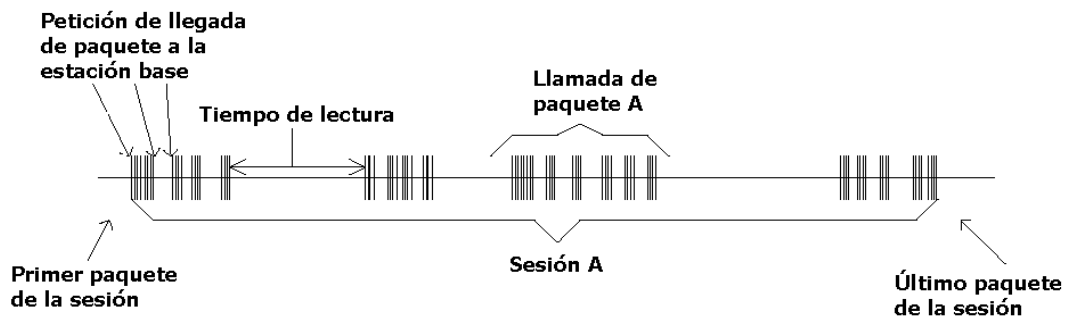
Las tasas variables son posibles para cada llamada de paquete, porque son dependientes de los requerimientos de los recursos de disponibilidad y *QoS*. Las

aplicaciones de datos mezcladas crean servicios heterogéneos, debido a que es difícil tener un simple servicio que cubra todos los diferentes servicios de datos.

4.3.2. Sesiones de búsqueda en web (*HTTP*)

Una sesión está definida como una sesión de búsqueda web que incluye el tiempo de descarga del paquete y el tiempo de lectura. Cada llamada de paquete puede ser tratada como un descarga de una página web. Cada sesión, podría tener múltiples llamadas de paquete. El esquema se muestra en la figura 95.

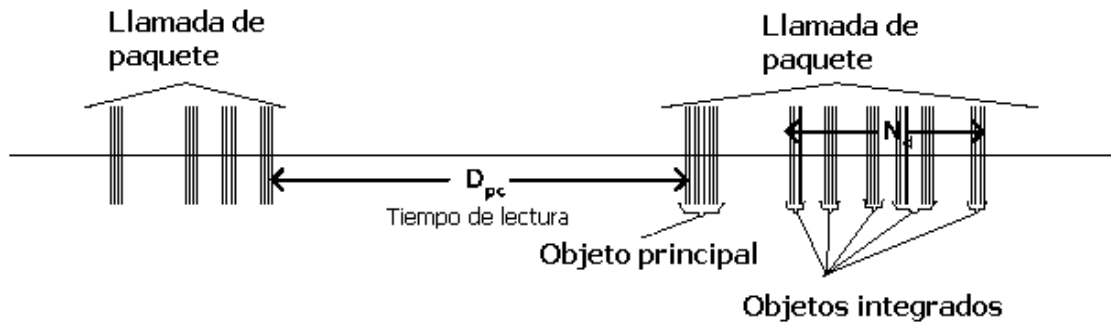
Figura 95. Sesión de búsqueda web



FUENTE: Ingeniería de tráfico de voz y datos. s.d.e.

En cada llamada de paquete, se podrían tener múltiples objetos y cada objeto podría tener múltiples paquetes. Como se muestra en la figura 96.

Figura 96. Llamadas de paquetes (páginas web)

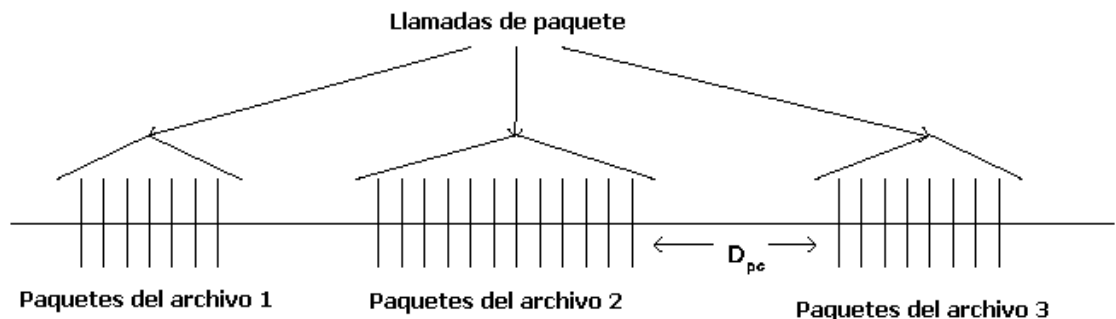


FUENTE: Ingeniería de tráfico de voz y datos. s.d.e.

4.3.3. Modelo *FTP* (*file transfer protocol*)

TCP es el protocolo de transporte fundamental para *FTP* diferente del *http*, todos los paquetes son de simple objeto (archivo). En la figura 97 se muestra un esquema del flujo de llamadas de paquetes como archivos.

Figura 97. Modelo *FTP*



FUENTE: Ingeniería de tráfico de voz y datos. s.d.e.

4.3.4. Protocolo *RTP/RTCP* y *RTSP*

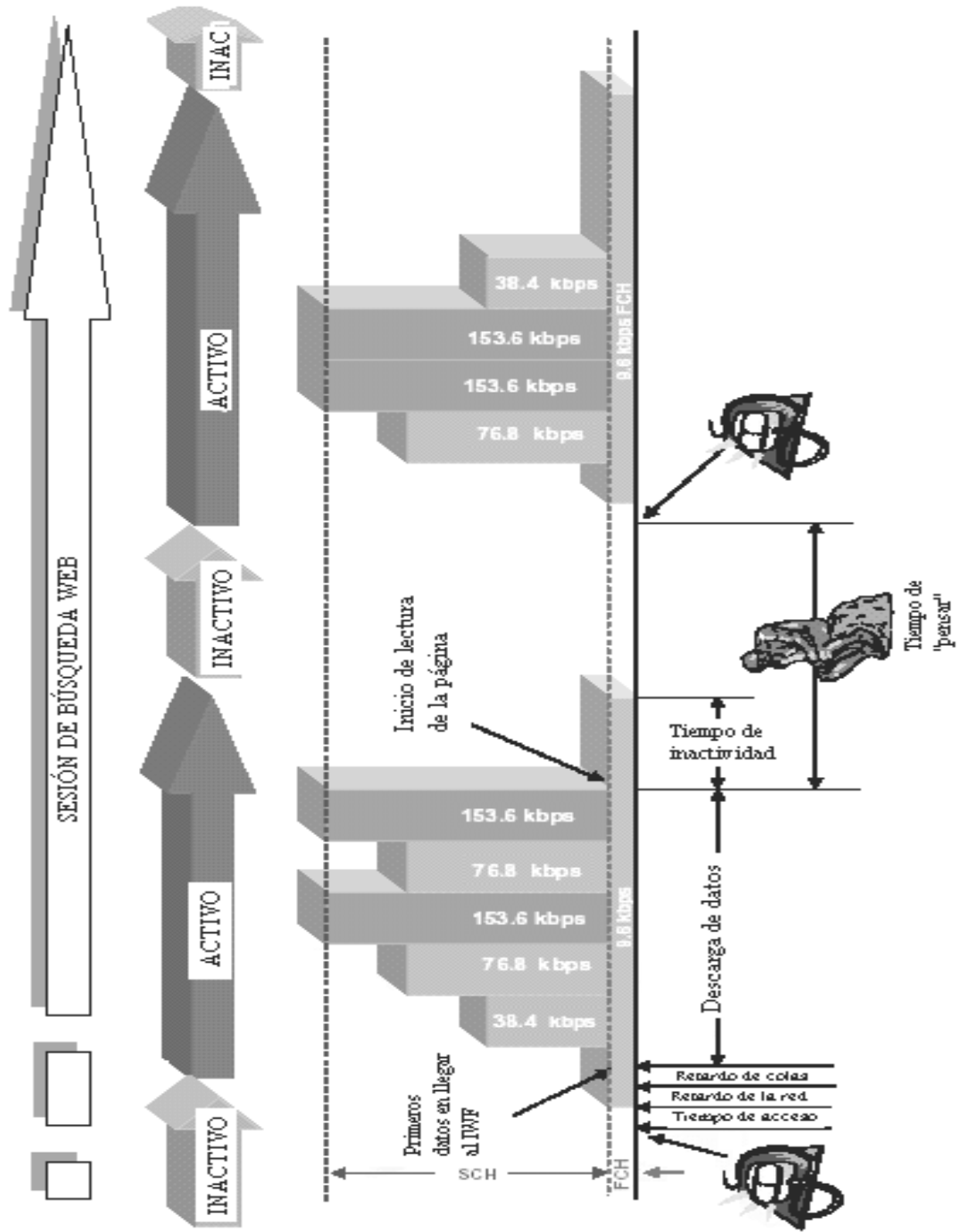
***RTP* (Protocolo de tiempo real).** Entrega datos en tiempo real al usuario. *RTP* no tiene todas las funciones de un protocolo de transporte. Típicamente es usado por encima de *TCP* o *UDP*.

***RTCP* (Protocolo de control de tiempo real).** Usado en conjunción con *RTP*. En *RTCP* los datos son enviados fuera periódicamente entre datos *RTP*. *RTCP* proporciona información tal como reportes de envío y recepción y estadísticas acerca de la conexión.

***RTSP* (Protocolo de flujo de tiempo real).** Es un control del flujo de media sobre el internet en tiempo real. El *RSTP* actúa como un mecanismo que controla el tren de datos de multimedia.

En la figura 98 se muestra un ejemplo de flujo de datos en el sistema *CDMA2000*.

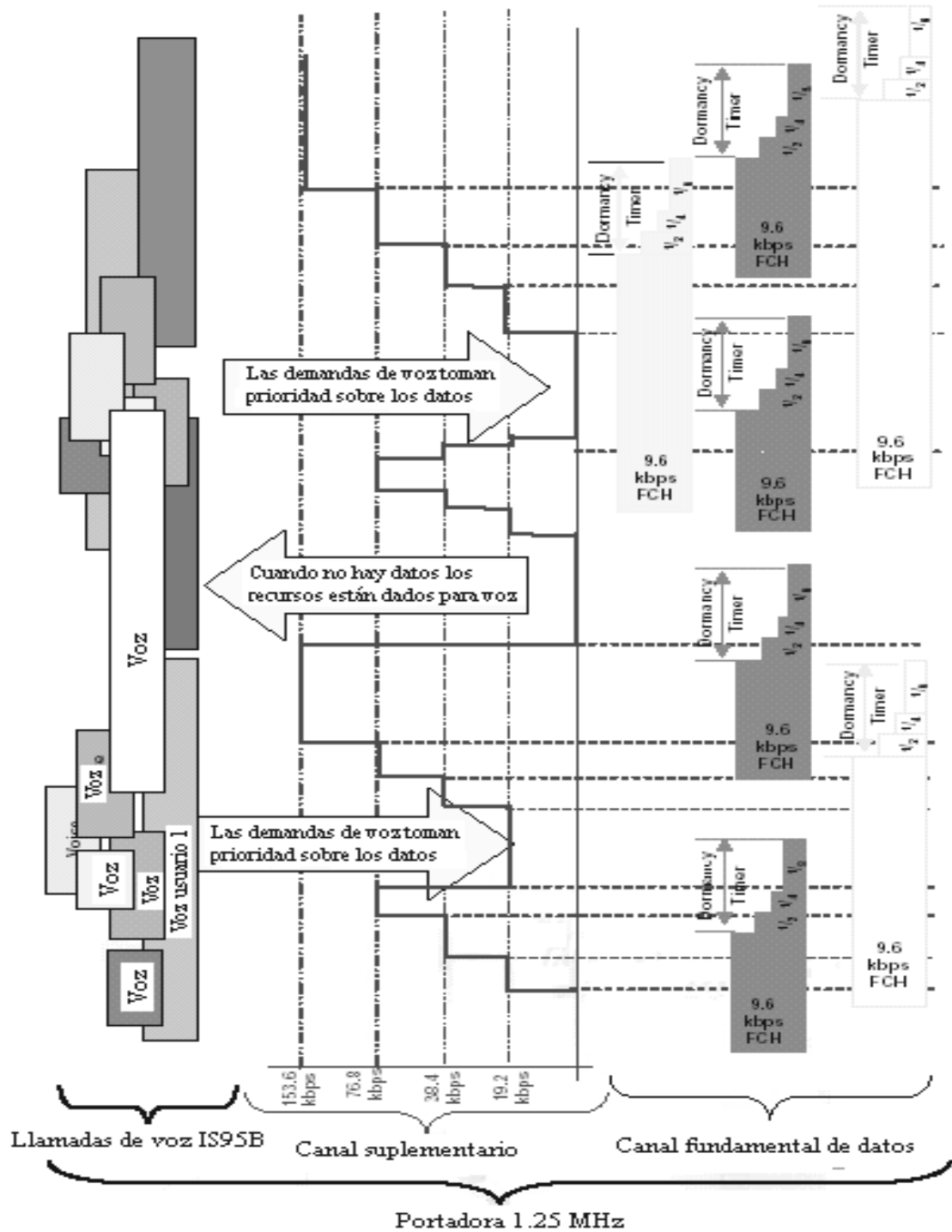
Figura 98. Flujo de datos en el sistema *CDMA2000*



FUENTE: Ingeniería de tráfico de voz y datos. s.d.e.

En la figura 99 se muestra un ejemplo de la interacción de datos y voz.

Figura 99. Interacción de datos y voz en CDMA2000



FUENTE: Ingeniería de tráfico de voz y datos. s.d.e.

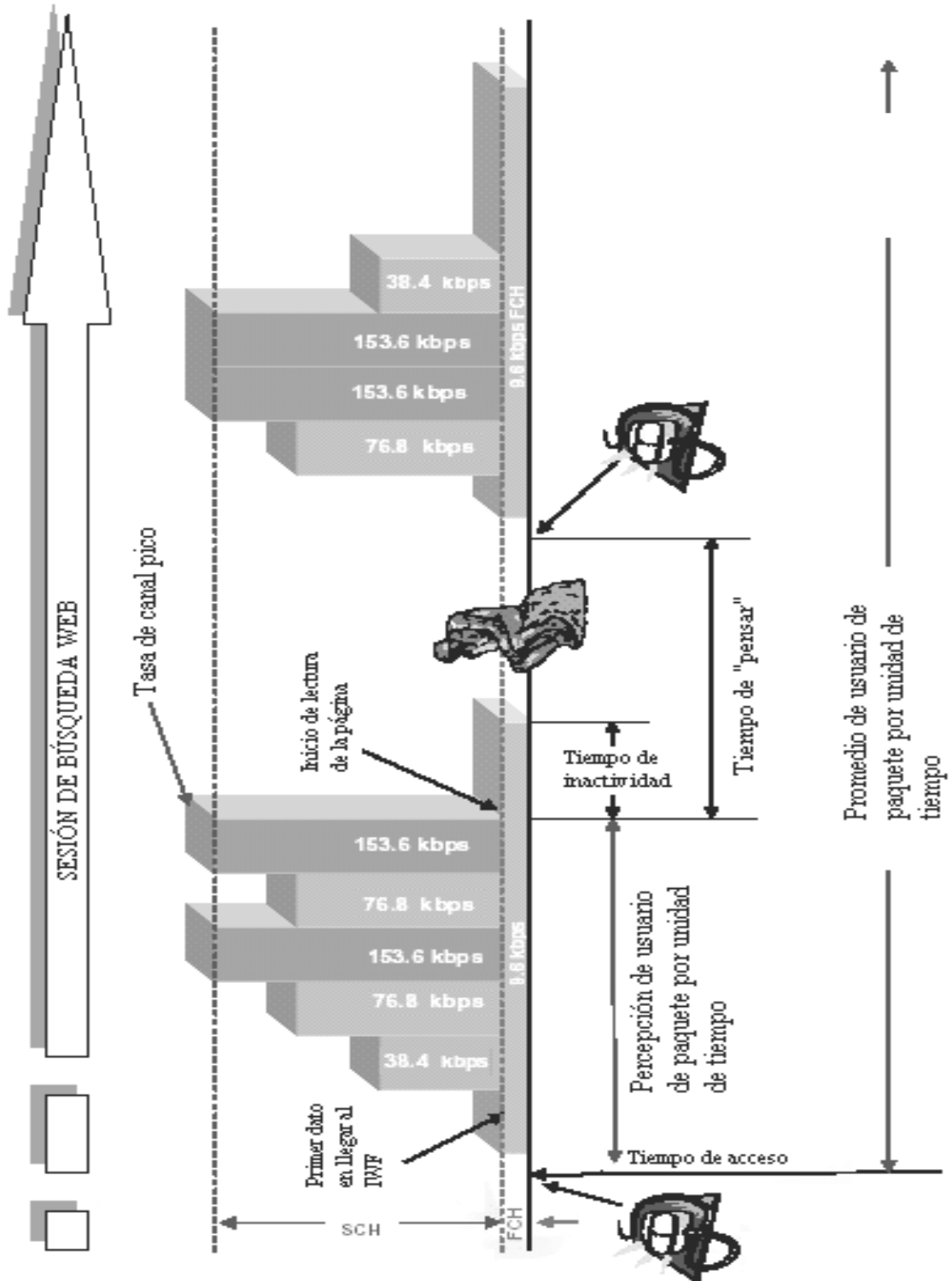
4.3.5. Medida de datos

Entre éstas cabe mencionar las siguientes:

- **Las tasas de canal pico.** Son usadas para representar la capacidad en diferentes tecnologías, esto es menos significativo sin información de qué tan frecuente esta tasa de datos podría ocurrir. Una sola tasa no es indicativa del ritmo al cual los datos pueden ser entregados al usuario final.
- **Promedio de los datos de usuario de paquetes por unidad de tiempo.** Definido como la proporción total de datos de usuario descargados en una sesión total de tiempo. La sesión de tiempo incluye el tiempo de descarga y el “pensar” (tiempo de lectura). Es utilizado principalmente para propósitos de planificación de la red.
- **Percepción promedio de usuarios de paquetes por unidad de tiempo.** Definido como la proporción del tamaño de la descarga de datos para un tiempo transcurrido.
- **Promedio agregado de paquetes por unidad de tiempo.** Utilizado para medir el desempeño de la red. Captura la tasa promedio total de entrega a través del área de cobertura de la celda para los enrutadores de los datos de los usuarios.

En la figura 100 se da un ejemplo de las medidas utilizadas para los datos.

Figura 100. Medidas de flujo de datos



FUENTE: Ingeniería de tráfico de voz y datos. s.d.e.

4.3.6. Ingeniería de tráfico de datos basada en el uso de información disponible.

D_{usoBH} está definida como el uso de datos *BH* (*busy hour*) por suscriptor. Los canales requeridos o portadoras N_C son calculados con la siguiente ecuación:

$$N_C = \frac{D_{usoBH}}{(T_C \times U_{FACTOR})} \quad (\text{Canales ó unidades}) \quad (4.4)$$

Donde:

T_C : son los paquetes por unidad de tiempo agregados por canal o portadora.

U_{FACTOR} : es la utilización del canal o portadora basado en diferentes aplicaciones de datos.

4.4. Medición y análisis de tráfico de datos

Las tasas de transferencias de datos en una red celular varían de acuerdo con varios factores como el número de usuarios conectados a la red, también depende de la capacidad del procesamiento de los nodos existentes en la red. Una tasa de transferencia de datos dentro de una red varía aleatoriamente, es decir, no en todos los instantes de tiempo que en que se realizan, por ejemplo, descargas de archivos se va a tener una velocidad de transferencia constante.

Antes del análisis de los datos obtenidos en la medición del tráfico de datos se considerarán los siguientes términos:

Latencia. Es el tiempo que tarda un bit en llegar a su destino o un paquete de información. Su unidad de medida es el segundo y sus derivados. Puede haber latencias de horas y hasta de días. Tiene como limitante el tiempo de propagación.

Tasa de transferencia. Es la cantidad de bits/segundo que se transmiten.

Tasa real. En esta tasa influye la capacidad de usuarios. Se comparte la capacidad con varios usuarios, con ello disminuye la tasa de transferencia real. Depende de factores como:

- Muchos *ETD* (Elemento terminal de datos) que comparten la capacidad del canal.
- Se agregan encabezados y bits de detección de errores, etc.
- El encolamiento que los paquetes sufren a lo largo de la red.

Entonces se tiene la siguiente relación:

$$\text{Tasa de transferencia real} = \frac{\text{Tamaño de la transferencia}}{\text{Tiempo de transferencia}}$$

Tiempo de transferencia

Los tiempos que influyen en la latencia son los siguientes:

- **Tiempo de propagación:** depende del medio de propagación y la distancia que se va a recorrer.
- **Tiempo de transmisión:** es la relación entre el tamaño del paquete transferible y la velocidad del canal.
- **Tiempo de colas:** es el tiempo de paso por los nodos que integran la red.

Entonces:

$$\text{LATENCIA} = \text{Tiempo de propagación} + \text{Tiempo de transmisión} + \text{Tiempo de colas}$$

O bien:

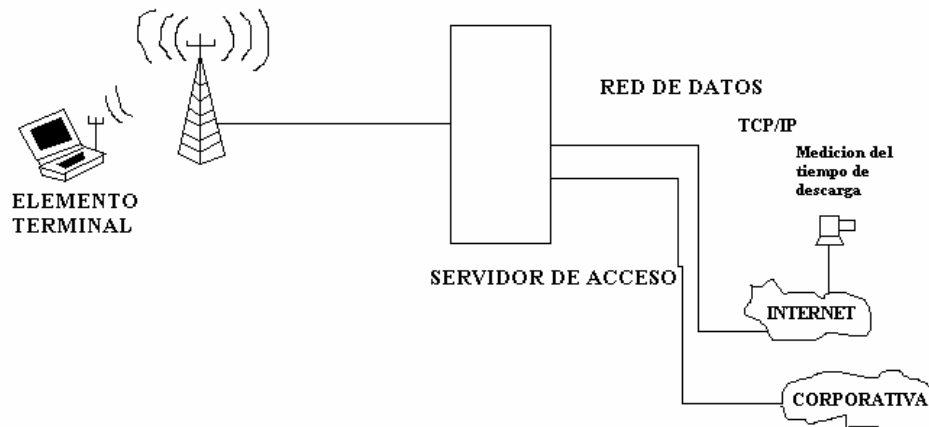
$$\text{LATENCIA} = \frac{\text{Distancia a recorrer}}{\text{Velocidad de la luz}} + \frac{\text{Tamaño de paquete}}{\text{Tasa de transferencia}} + \text{Tiempo de colas}$$

Velocidad de la luz Tasa de transferencia

Para el análisis de la capacidad de tráfico de datos se toma en cuenta la prueba de latencias y la velocidad o tasa de transferencia.

La medición del tráfico de datos se llevó a cabo a través de una computadora personal, como elemento terminal, la cual estaba conectada a una red celular *CDMA-1x*, tal como lo muestra la figura 101.

Figura 101. Esquema utilizado en la medición del tráfico de datos



La medición consistió en la toma de 10 muestras, basadas en la descarga de un mismo archivo, a través del computador vía internet inalámbrico. Se obtuvieron los datos de latencia y velocidad de transferencia, con un software auxiliar como lo muestra el esquema de la figura 101 nombrado “medición del tiempo de descarga”. La velocidad de transferencia varía, no es un valor fijo, para la red celular *CDMA-1x*, analizada se mantiene entre los rangos de 50 – 90 Kbps. Dependiendo de qué tan saturada se encuentre la red, dichos valores como el mínimo que se mencionó podría ser más bajos.

En la tabla XVIII se muestran los datos de las 10 muestras obtenidas en la descarga de un archivo de un tamaño de 571560 bytes.

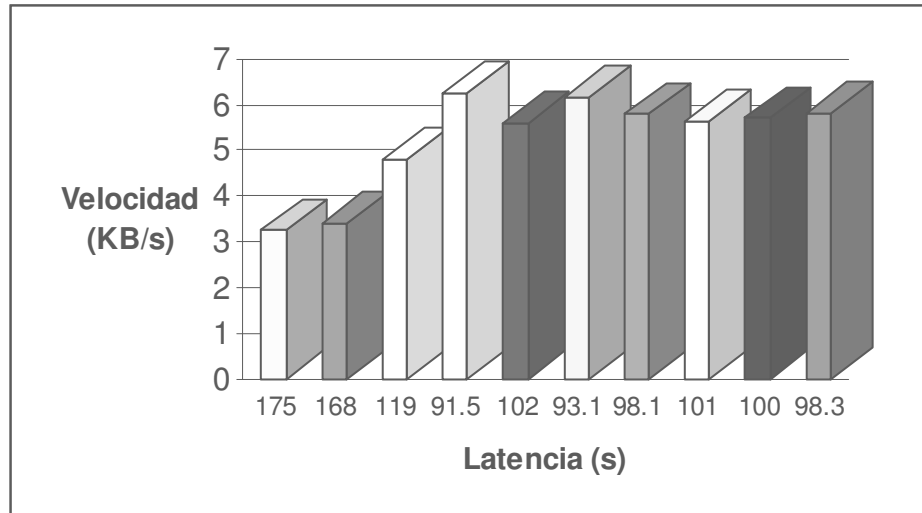
Tabla XVIII. Muestras obtenidas en la medición del tráfico de datos

Tiempo (latencia)	Velocidad (KB/s)	Velocidad en Kbps
175.28	3.26	26.08
167.9	3.41	27.28
119.12	4.8	38.4
91.45	6.26	50.08
102.11	5.6	44.8
93.06	6.15	49.2
98.08	5.79	46.32
101.47	5.64	45.12
100.32	5.7	45.6
98.32	5.82	46.56

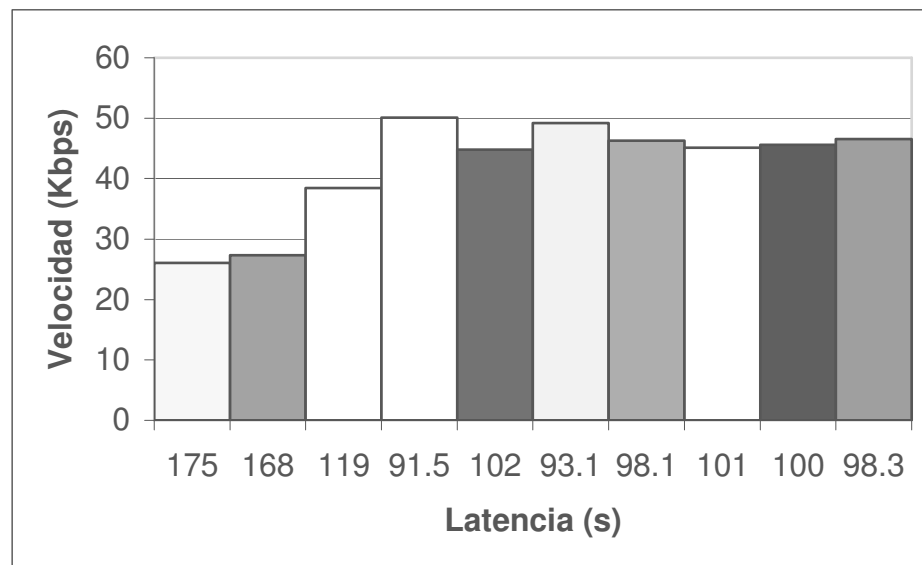
El tiempo medido está en segundos, la velocidad de transferencia está en Kbytes/segundos y su equivalente en Kbits/segundo. Como se puede ver en la tabla XVIII, para un mismo archivo de tamaño fijo se obtuvieron 10 valores distintos de latencia y de velocidad de transferencia, algunas velocidades se aproximan una a la otra. Lo cual implica que la tasa de transferencia de un paquete dentro de una red es un valor aleatorio, dándolo a conocer en los valores mostrados en la tabla XVIII. Como se puede observar, el valor más bajo de velocidad de transferencia fue de 26.08Kbps y el máximo fue de 50.08 Kbps. Estos resultan mínimos y máximos relativos. Como se ha mencionado con anterioridad, la velocidad y tiempo de latencia dependen de factores como propagación del paquete dentro de la red y del procesamiento de los nodos.

La velocidad promedio de transferencia fue de 41.94Kbps y el tiempo de latencia promedio fue de 114.71 segundos. En la figura 102 se muestra la gráfica del comportamiento de cada una de las muestras tomadas.

Figura 102. Gráfica velocidad de transferencia frente a la latencia a) velocidad en Kbytes/segundo b) velocidad en Kbits/segundo



a)



b)

El tamaño del archivo descargado fue de 571560 bytes (4572480 bits), lo cual implica que si se toma el valor de la relación del tamaño del paquete entre la latencia medida, se obtendría la tasa de transferencia cuyo valor se compararía con los medidos

para la verificación de la relación. En la tabla XIX se muestra el cálculo de la tasa de transferencia con los respectivos valores de latencias en base al tamaño del archivo de 571560 bytes.

Tabla XIX. Comparación entre la velocidad de transferencia medida y la calculada

Tamaño del archivo: 571560 bytes		
Tiempo (latencia)	Velocidad en Kbps	Velocidad en Kbps
Medido	Medida	Calculada
175.28	26.08	26.09
167.9	27.28	27.23
119.12	38.4	38.39
91.45	50.08	50.00
102.11	44.8	44.78
93.06	49.2	49.13
98.08	46.32	46.62
101.47	45.12	45.06
100.32	45.6	45.58
98.32	46.56	46.51

Las velocidades de transmisión obtenidas están asociadas a la suma de un canal fundamental (*FCH*) más una canal suplementario (*SCH*), es decir, que el valor total obtenido en la medición viene dado por la suma de $FCH + SCH$, siendo $FCH = 9.6\text{Kbps}$ y $SCH = (9.6 + n9.6)\text{Kbps}$. El factor $n9.6\text{Kbps}$ implica la porción de canal fundamental asignado al canal suplementario en cada una de las descargas del archivo que se realizaron, la porción total del canal suplementario esta asignada a una variable de tipo aleatorio.

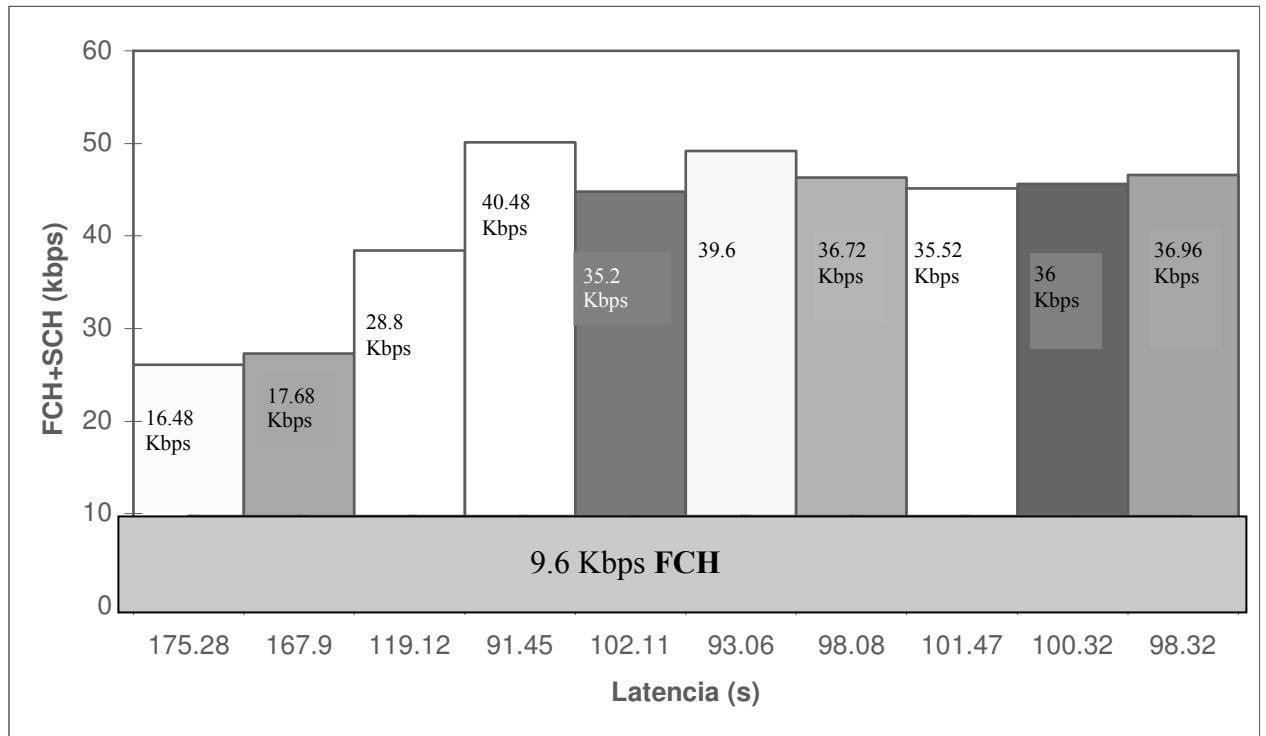
En la tabla XX se muestra la porción de canal suplementario que se asignó a cada muestra obtenida durante la medición.

Tabla XX. Porción de canal suplementario asignada a cada una de las muestras de medición

Tamaño del archivo: 571560 bytes			
Tiempo (latencia) Medido	Velocidad en Kbps Medida	Canal Fundamental 9.6 Kbps	Tamaño del canal suplementario utilizado
175.28	26.08	9.6	16.48
167.9	27.28	9.6	17.68
119.12	38.4	9.6	28.8
91.45	50.08	9.6	40.48
102.11	44.8	9.6	35.2
93.06	49.2	9.6	39.6
98.08	46.32	9.6	36.72
101.47	45.12	9.6	35.52
100.32	45.6	9.6	36
98.32	46.56	9.6	36.96

Por ejemplo, en la primera muestra tomada donde la velocidad medida fue de 26.08Kbps, dicha velocidad está compuesta por la suma de una tasa de un canal fundamental más una tasa de canal suplementario, la relación es igual a $\frac{9.6Kbps}{14.24} + \frac{(9.6 + n \cdot 9.6)Kbps}{4.43}$ o $9.6Kbps + k$ donde $k = (9.6 + n \cdot 9.6)Kbps$. Si se iguala la relación anterior, con el primer valor medido de velocidad, es decir, $26.08 = 9.6 + k$, al despejar k queda: $k = 26.08 - 9.6 = 16.48Kbps$, que es el tamaño del canal suplementario asignado. En la figura 103 se muestra gráficamente la porción de canal suplementario asignado a cada muestra de medición.

Figura 103. Tamaño del canal suplementario asignado a cada una de las muestras de medición



De la relación anterior, $9.6\text{Kbps} + (9.6 + n9.6)\text{Kbps}$, el término $(9.6 + n9.6)$ tiene un valor máximo de 153.6Kbps en CDMA-1x y, además, $n9.6$ tiene un máximo de 144Kbps , donde n tiene un valor de 15. En la tabla XXI se muestran los valores de n asignados en cada medición, como también el porcentaje de canal suplementario que fue utilizado en cada descarga del archivo.

Tabla XXI. Porcentaje de utilización del canal suplementario en cada medición

Tamaño del archivo: 571560 bytes			
Tamaño máximo FCH + SCH = 163.2 Kbps			
Tamaño máximo del SCH = 153.6 Kbps			
Velocidad en Kbps Medida	Tamaño del SCH utilizado	Porcentaje del SCH utilizado	Factor <i>n</i>
26.08	16.48	10.73%	0.717
27.28	17.68	11.51%	0.842
38.4	28.8	18.75%	2.000
50.08	40.48	26.35%	3.217
44.8	35.2	22.92%	2.667
49.2	39.6	25.78%	3.125
46.32	36.72	23.91%	2.825
45.12	35.52	23.13%	2.700
45.6	36	23.44%	2.750
46.56	36.96	24.06%	2.850

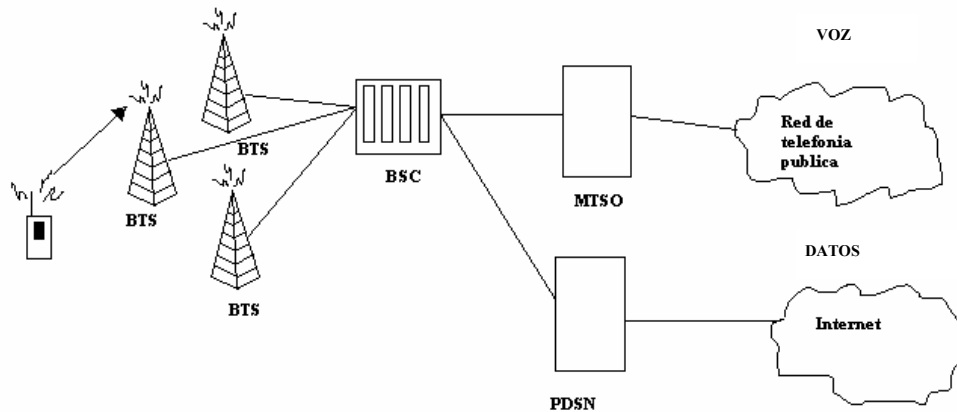
Como se puede ver en la tabla anterior, el porcentaje de asignación del canal suplementario varía de una manera aleatoria, lo que quiere decir de que si un usuario, por ejemplo, se conecta para navegar en internet en una red celular *CDMA*, a dicho usuario se le asigna un canal fundamental de 9.6Kbps y, a la vez, la red le asigna un porcentaje del canal suplementario hasta un máximo de 153.6Kbps. Como en la red existen otros usuarios conectados, la tasa en Kbps del canal suplementario asignado a un usuario varía de tal forma que disminuye o aumenta según sea el número de usuarios, es decir, la red fracciona el canal suplementario a cada usuario que se conecta de tal manera que si aumenta el número de usuarios, dicho porcentaje disminuye hasta llegar a valores muy bajos, lo que da a entender de que si un usuario se quiere conectar a un red saturada es posible que solamente cuente con la asignación de un canal fundamental, o simplemente no pueda establecer conexión con la red.

4.5. Análisis de tráfico de voz

En una llamada de voz la red celular asigna a cada usuario un canal fundamental de 9.6Kbps. por lo que cuando no existen llamadas de datos, los recursos de la red celular están dados para voz, dándose también el caso en que las demandas de voz toman prioridad sobre los datos, como se dio a conocer en la figura 99. A este respecto, conviene tomar en cuenta que la unidad de medida del volumen de tráfico de voz es el *erlang*, el modelo *Erlang B* decide la capacidad de voz en *erlangs*, y esto se usa para propósitos de dimensionamiento. La medida de tráfico en *erlangs* estima cuántas líneas son requeridas entre un sistema telefónico y un central (*PSTN*) o entre localizaciones de redes múltiples.

El *PDSN* (nodo de conmutación de paquete de datos) no se comunica directamente con la red de voz, tal y como se muestra en la figura 104.

Figura 104. Interacción de voz y datos con el BSC



La central de conmutación de telefonía móvil (*MTSO*), interactúa con la red de conmutación de telefonía pública (*PSTN*), así se genera el tráfico de voz (*erlangs*). El *PDSN* interactúa con la red de internet y otras redes de datos, ya sean públicas o privadas, generándose el tráfico de datos (Kbps). La *MTSO* y el *PDSN* interactúan con el

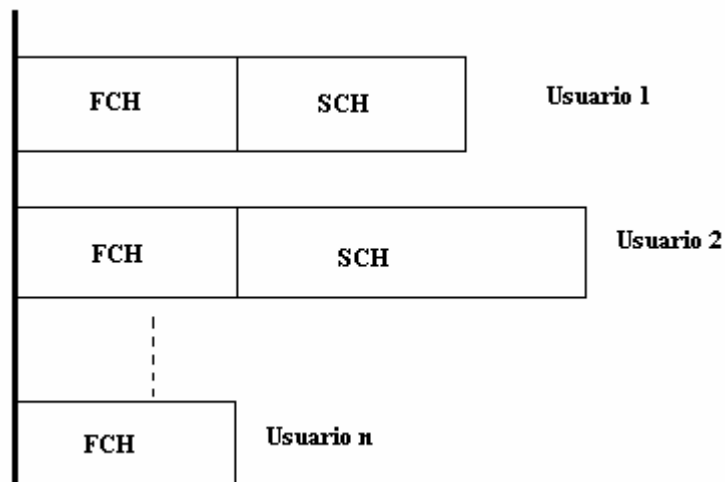
controlador de estación base (*BSC*), y el *BSC* con las estaciones transreceptoras base (*BTS*).

4.6. Impacto en la infraestructura de la red

Cuando en una red de telefonía celular se implementa un nuevo servicio de transmisión de datos, la infraestructura de la red se ve impactada con el nuevo servicio, en el sentido de velocidad y latencia, lo cual da como resultado una de las posibles consecuencias, que sería la disminución de la velocidad y, por ende, el aumento de la latencia.

Por otro lado, existe la posibilidad de que la red no se impacte o que la velocidad de transmisión de los paquetes disminuya en un bajo porcentaje como también el aumento del tiempo de latencia en un bajo porcentaje. A manera de ejemplo, se considerará el esquema que se muestra en la figura 105.

Figura 105. Asignación de canal fundamental y suplementario a n usuarios



En la figura 105 se cuenta con n usuarios, de tal forma que el usuario 1, se conecta a la red y se le asigna cierto porcentaje de canal suplementario, luego un usuario 2 se

conecta a la red y se le asigna otro porcentaje de canal suplementario. Como se puede ver, este porcentaje es mayor que el anterior, lo cual se debe a que algún usuario o grupo de usuarios que estaban conectados dejaron de establecer conexión y la red asignó un porcentaje mayor al usuario 2. Para el n -ésimo usuario, sólo cuenta con un canal fundamental sin ningún porcentaje de canal suplementario, debido a que posiblemente en ese instante se conectó un mayor grupo de usuarios a la red.

Entonces con el nuevo servicio implementado en la red, mediante la realización de mediciones de tráfico de datos, se vería qué impacto provocó en la red este nuevo servicio, en qué porcentaje disminuyó la velocidad y aumentó la latencia de paquetes, analizando con ello, si el nivel de porcentaje de disminución de velocidad y latencia en la red es tolerable, conjuntamente con el desempeño de paquetes.

4.7. Análisis de la existencia de una relación entre la unidad de medida de tráfico de voz y la unidad de medida de tráfico de datos.

La unidad de medida del volumen del tráfico de voz, como se ha visto con anterioridad, es el *erlang* y la unidad de medida correspondiente al tráfico de datos es el Kbps. Se ha visto que en una llamada de voz, la red celular asigna un canal fundamental de 9.6Kbps, por lo tanto, dicha que cantidad es asignada al tráfico de voz, existiendo una relación entre la unidad de medida del tráfico de voz y la unidad de medida del tráfico de datos. Dicha relación implica el cálculo de estimación de la capacidad de radio en *erlangs* por sector, en enlace directo y reverso, o *erlangs* por frecuencia por celda, relacionando la tasa de chips y la tasa de información de datos.

4.7.1. Verificación de la existencia de la relación entre la unidad de medida de tráfico de voz y la unidad de medida del tráfico de datos

La verificación de la existencia de una relación entre el *erlang* y el Kbps, se ve claramente en las ecuaciones 4.1 y 4.2, las cuales calculan la capacidad de radio, tanto en tráfico directo como en tráfico reverso en *CDMA*, cuyas dimensionales son en *erlangs*.

El cálculo de la capacidad relaciona varios factores de diseño tales como la tasa de información de datos, esta es en Kbps y los demás parámetros descritos en la sección 4.1.3. Entonces se da la existencia de una relación entre el *erlang* y el Kbps acompañada de factores de diseño o variables que determinan la capacidad de *CDMA* en celdas o sectores.

CONCLUSIONES

1. Las mediciones de tráfico de datos en una red celular, se llevan a cabo mediante las siguientes pruebas: latencia, velocidad de transferencia y el desempeño de la transferencia de paquetes en la red. Mediante el análisis de estos parámetros se llega a determinar el desempeño de la red y si las muestras de medición se encuentran dentro de un rango de valores tolerables de rendimiento. Esto permite mejorar los recursos del sistema.
2. El diseño y cálculo de un sistema celular de voz se realiza tomando en cuenta la probabilidad de bloqueo. Ésta es la forma más sencilla de considerar si están todos los canales ocupados y se produce una llamada así como su rechazo. Este control se hace según los parámetros del *Erlang-B* (probabilidad de pérdida de una llamada). Si la llamada se coloca en una cola de espera durante cierto tiempo, se seguirá la distribución *Erlang-C* (probabilidad de que una llamada tenga retraso).
3. La existencia de una relación entre la unidad de medida del volumen del tráfico de voz *Erlang* y la unidad de medida del tráfico de datos Kbps y sus derivados, consiste en el involucramiento de variables de diseño que determinan la capacidad en *CDMA* tales como: tasa de chips, la tasa de información de datos (Kbps), relación de la señal y ruido y otras variables cuyos valores están predeterminados en tablas de diseño.

4. Cuando en una red de telefonía celular se implementa un nuevo servicio de transmisión de datos, la infraestructura de la red se ve impactada con el nuevo servicio, en el sentido de velocidad y latencia, esto da como resultado una de las posibles consecuencias, que sería la disminución de la velocidad y, por ende, el aumento de la latencia. Por otro lado, puede dar la posibilidad de que la red no se impacte con la implementación del nuevo servicio de transmisión de datos.

RECOMENDACIONES

1. En las redes de telefonía celular es necesario que se realicen mediciones periódicas de tráfico para determinar el comportamiento y desempeño de la red y, además, mejorar los recursos existentes y su administración correspondiente a la vez que se aprovecha el ancho de banda disponible.
2. Para la realización de una administración óptima de una red celular de datos, se debe contar con una guía confiable que utilice herramientas basadas en el sistema operativo Linux, ya que éste se está convirtiendo en el sistema operativo de elección no sólo para computadores personales, sino para redes de gran escala.
3. Cuando se mide un sistema celular de voz se debe tomar en cuenta que la aplicación de los modelos de tráfico de voz, supone algunas condiciones que no se cumplen en la realidad, por ejemplo, para la aplicación del modelo de *Erlang-B*, en caso de congestión, se entiende que la llamada es desconectada y no hay segundo intento; se piensa que el usuario no hará un nuevo intento de llamada, contrariamente a lo que normalmente se realiza. Para el caso de *Erlang-C* se asume que todas las personas que llaman se mantendrán en la línea por el tiempo que sea necesario para que su llamada sea atendida. Estas diferencias generan que los resultados teóricos no sean exactos.

4. La realización de un análisis estadístico de las muestras obtenidas en la medición de tráfico de datos en una red celular, es un factor importante en el sentido de que el grupo de muestras tomadas representa el comportamiento general de la red y, a la vez, permite ver qué impacto tendría en la infraestructura de la red al momento de implementar un nuevo servicio de transmisión de datos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Couch, León W. **Sistemas de comunicación digitales y analógicos**. 5ª. ed. México: Editorial Pearson Educación, 1998. 740pp.
2. García, Jesús y otros. **Redes de alta velocidad**. México: Editorial Alfaomega, 1997. 250pp.
3. Korhonen, Juha. **Introduction to 3G Mobile Communications**. 2a. ed. Boston: Editorial Artech House, 2003. 672pp.
4. Lee Y., William C. **Mobile Cellular Telecommunications**. New York: Editorial McGraw-Hill, 1995. 750pp.
5. Rosenverg, Adam y Sid Kemp. **CDMA Capacity and Quality Optimization**. Boston: Editorial McGraw-Hill, 2003. 629pp.
6. Schwartz, M. **Telecommunication Networks: Protocols Modeling Analysis**. New Jersey: Addison-Wesley, 1987. 642pp.
7. Smith, Clint y Daniel Collins. **3G. Wireless Networks**. New York: Editorial McGraw-Hill, 2003. 747pp.
8. Stallings, William. **Data & computer communications**. 6a. ed. New Jersey: Editorial Prentice Hall, 2000. 740pp.
9. Tanenbaum, Andrew S. **Redes de computadoras**. 3ª. ed. México: Editorial Prentice Hall, 1999. 813pp.

10. Taub, Herbert y Donald L. Schilling. **Principles of communication systems**. 2a. ed. New York: Editorial McGraw-Hill, 1986. 759pp.