



**UNIVERSIDAD
NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA



ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LAS REDES CELULARES GSM-GPRS

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

PRESENTA:

PATRICIA MARÍA SÁNCHEZ GÓMEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. VÍCTOR RANGEL LICEA

CIUDAD UNIVERSITARIA

SEPTIEMBRE, 2005



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A Dios:

Por darme la vida, la fortaleza y capacidad para concluir este sueño.

A mis Padres:

Por todo el esfuerzo y dedicación que pusieron para que lograra terminar mis estudios. A ustedes debo todo lo que hoy soy. Les agradezco su confianza, paciencia y amor incondicional de todos estos años.

A mis hermanos:

Por compartir conmigo esta vida, darme su cariño y soportar en los momentos difíciles.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	v
1 Introducción	1
1.1 Sistemas de Redes Celulares	1
1.2 Definición del problema	2
1.3 Justificación e hipótesis	2
1.4 Objetivos	3
1.5 Contribuciones	3
1.6 Estructura de la tesis	3
2 Sistema de Radiotelefonía Celular	5
2.1 Antecedentes	5
2.2 Conceptos básicos	8
2.2.1 Elementos de una red celular	9
2.2.2 Proceso de llamada	10
2.2.3 Célula o celda	11
2.2.3.1 "Cell-Splitting"	11
2.2.3.2 Geometría celular	12
2.2.3.3 Localización de la radiobase (BST)	14
2.2.3.4 Tolerancia en la ubicación de la BST	16
2.2.3.5 Mínimo radio de la célula	16
2.2.3.6 Máximo radio de la célula	16
2.2.4 Cluster o racimo	17
2.2.5 Cobertura	17
2.2.6 Capacidad	18
2.2.7 Reuso de frecuencias	20
2.2.8 Interferencia co-canal	20
2.2.9 Señalización	20
2.2.10 Proceso de cambio de BST (<i>Handover</i>)	21
2.2.11 HLR	22
2.2.12 VLR	22
2.2.13 Área de localización	22
2.2.14 Registro	22
2.2.15 Roaming o Itinerancia	22
2.2.16 Topología de la red celular	23
2.2.17 Calidad	23
2.3 Subsistemas de una red celular	24
2.3.1 Radio	24
2.3.2 Conmutación	24
2.3.3 Transmisión	24
2.3.4 Operación y Mantenimiento	24
2.3.5 Explotación	24
2.4 Resumen del capítulo	24
3 Evolución de los sistemas celulares	25
3.1 Sistemas celulares de 1ª. Generación	25
3.1.1 Características principales	25
3.1.2 Topología y operación de la red	26
3.1.3 Técnicas de acceso	29
3.1.4 Servicios y funcionalidad	29
3.1.5 Sistemas principales de 1G	30

3.1.5.1	Advanced Mobile Phone Service (AMPS).....	30
3.1.5.2	Total Access Communication System (TACS).....	30
3.1.5.3	Nordic Mobile Telephone (NMT).....	31
3.1.5.4	Narrowband AMPS (NAMPS).....	32
3.1.5.5	Japanese Mobile Cellular System (MCS).....	32
3.1.5.6	CNET.....	33
3.1.5.7	MATS-E.....	33
3.2	Sistemas celulares de 2ª. Generación.....	33
3.2.1	Características principales: Digitalización y compresión de voz.....	33
3.2.2	Topología y operación de la red.....	34
3.2.3	Técnicas de acceso.....	37
3.2.4	Servicios y funcionalidad.....	38
3.2.5	Sistemas principales de 2G.....	38
3.2.5.1	GSM (<i>Global System for Mobile Communication</i>).....	38
3.2.5.2	IS-136 TDMA (TDMA Norteamericano).....	39
3.2.5.3	TDMA Extendido (E-TDMA Extended TDMA).....	40
3.2.5.4	Code Division Multiple Access (IS-95 CDMA).....	41
3.2.5.5	Japanese Personal Digital Cellular (PDC).....	42
3.3	Sistemas celulares de 2.5 G:.....	43
3.3.1	Características principales: Conmutación y transmisión de paquetes.....	43
3.3.2	Topología y operación de la red.....	44
3.3.3	Técnicas de acceso.....	44
3.3.4	Servicios y funcionalidad.....	45
3.3.5	Sistemas principales de 2.5 G.....	45
3.3.5.1	HSCSD (<i>High Speed Circuit Switched Data</i>).....	45
3.3.5.2	GPRS (<i>General Packet Radio Service</i>).....	45
3.3.5.3	EDGE (<i>Enhanced Data Rates for Global Evolution</i>).....	46
3.3.5.4	CDMA2000™, 1xRTT.....	46
3.4	Sistemas celulares de 3ª. Generación.....	46
3.4.1	Características principales: Redes multiservicio.....	46
3.4.2	Topología y operación de la red.....	48
3.4.3	Técnicas de acceso.....	48
3.4.4	Servicios y funcionalidad.....	48
3.4.5	Sistemas principales de 3G.....	49
3.4.5.1	Asignación del espectro para IMT-2000.....	49
3.4.5.2	Interfaces de aire IMT-2000.....	50
3.4.5.3	WCDMA (<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>).....	50
3.4.5.4	Code Division Multiple Access 2000 (CDMA2000).....	51
3.4.5.5	TD-SCDMA (<i>Time Division Synchronous CDMA</i>).....	52
3.5	Perspectivas y evolución hacia la 4ª. Generación.....	52
3.5.1	Estándar americano: IEEE 802.11 e IEEE 802.16.....	54
3.5.1.1	IEEE 802.11.....	54
3.5.1.2	IEEE 802.16 (Wi-Max):.....	55
3.5.2	Estándar europeo: ETSI BRAN.....	56
3.5.2.1	HiperLAN2.....	56
3.5.2.2	HIPERACCESS:.....	56
3.5.2.3	HIPERMAN:.....	56
3.6	Resumen del capítulo.....	56
4	Tecnología GSM.....	57
4.1	Global System Mobile (GSM).....	57
4.1.1	Nodos de la red GSM.....	57
4.1.2	Interfaces GSM.....	59
4.1.3	Canales lógicos.....	59

4.2	General Packet Radio Service (GPRS)	61
4.2.1	Arquitectura del protocolo	62
4.2.1.1	Proceso de codificación	65
4.2.1.2	Cálculo del <i>Throughput</i> RLC	68
4.2.2	Protocolo GPRS de la interaz aire	70
4.2.3	Flujo de datos	71
4.2.4	Canales lógicos GPRS	72
4.2.5	Modelo de operación	73
4.2.6	Transferencia de paquetes originada en el móvil	73
4.2.7	Transferencia de paquetes terminada en el móvil	75
4.3	Resumen del capítulo	76
5	Modelo analítico del sistema GPRS	77
5.1	Análisis del <i>throughput</i> y <i>delay</i> de los sistemas GPRS	77
5.1.1	Modelo matemático para el cálculo del <i>throughput</i> y el <i>delay</i>	78
5.1.2	Resultados	86
5.2	Análisis de la Eficiencia Volumétrica del Protocolo GPRS	92
5.3	Resumen del capítulo	98
6	Conclusiones	99
	REFERENCIAS	101
	Libros	101
	Artículos y Conferencias	101
	Páginas Web y Organizaciones	104
	ACRÓNIMOS	107
	APÉNDICE A	111
	APÉNDICE B	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Sistema Celular	10
Figura 2-2. Dos niveles de Split	12
Figura 2-3. Estructuras de las células	13
Figura 2-4 Área de las células.....	14
Figura 2-5 Localización de la BST	14
Figura 2-6. Ubicación de BST con antena omnidireccional	15
Figura 2-7 Ubicación de BST con antena sectorizada a 60° (cluster N=4)	15
Figura 2-8 Tolerancia en la ubicación de la BST	16
Figura 2-9 Reuso de frecuencias entre dos clusters adyacentes	20
Figura 2-10. Topología de la Red Celular	23
Figura 3-1. Sistema celular típico de 1ª. Generación.	28
Figura 3-2. Sistema celular típico de 2ª. Generación.	37
Figura 3-3. Sistema celular típico de 2.5G.	44
Figura 3-4 Tipo de servicios ofrecidos por las redes desde 2G hasta 3G	47
Figura 3-5 Sistemas Celulares de 3ª. Generación.	48
Figura 3-6 Evolución de GSM	51
Figura 3-7 Cobertura de los diferentes tipos de redes.	53
Figura 3-8 Incremento en el número de usuarios móviles.	54
Figura 4-1. Arquitectura de la red GSM.	57
Figura 4-2. Frame GSM	60
Figura 4-3. Arquitectura del sistema GPRS	61
Figura 4-4. Ejemplo de ruteo en una red GPRS.	62
Figura 4-5. Plano de transmisión GPRS	63
Figura 4-6. Estructura del bloque de radio GPRS	64
Figura 4-7. Procedimiento de codificación GPRS	65
Figura 4-8. Estructura del bloque de radio GPRS de downlink para la transmisión de datos de usuario.	66
Figura 4-9. Los 456 bits totales de un bloque codificado son divididos en 8 bloques de 57 bits	67
Figura 4-10. Estructura de un burst normal en GSM	68
Figura 4-11. Distribución de los bloques de radio GPRS en un multiframe de 52 frames.	68
Figura 4-12. Flujo de datos GPRS en la transformación del paquete.	71
Figura 4-13. Acceso aleatorio en la capa MAC y transmisión para la transferencia de datos uplink.	74
Figura 4-14. Secuencia del mensaje a través de la interfaz aire para tráfico originado en la MS.	75
Figura 4-15. Capa MAC: Acceso aleatorio y transmisión para la transferencia de datos downlink.	76
Figura 5-1. Estructura del multiframe-52 de GPRS utilizado.	79
Figura 5-2. Throughput del sistema GPRS como función de U y parámetro R.	87
Figura 5-3 Delay del sistema GPRS como función de U y parámetro R	89
Figura 5-4. Detalle del delay del sistema GPRS como función de U y parámetro R	89
Figura 5-5. Throughput como función de R y como parámetro la longitud del mensaje. U=40 usuarios.....	90
Figura 5-6. Throughput como una función del número de usuarios (U) y la longitud del mensaje como parámetro para R=8 slots de contención.	91
Figura 5-7 Throughput como función de R con longitud del mensaje=200 bytes y U como parámetro.	92
Figura 5-8. Encapsulamiento de datos en el stack de protocolos GPRS	93
Figura 5-9. Eficiencia Volumétrica del Protocolo GPRS (CS-1)	95
Figura 5-10. Eficiencia Volumétrica del Protocolo GPRS (CS-2)	95
Figura 5-11. Eficiencia Volumétrica del Protocolo GPRS (CS-3)	96
Figura 5-12. Eficiencia Volumétrica del Protocolo GPRS (CS-4)	96
Figura 5-13. Eficiencia volumétrica del protocolo GPRS.	97
Figura 5-14. Throughput y Probabilidad de error en la capa LLC para los 4 esquemas de codificación.	98

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 4-1. Canales de señalización GSM.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 4-2. Tamaño del bloque por cada esquema de codificación</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 4-3 Estructura del bloque de radio previa a la codificación del canal.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 4-4 Codificación de los bloques de radio en el canal, todos al final tienen 456 bits.</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 4-5 Cálculo del throughput del payload RLC.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 4-6. Cálculo del throughput del bloque de radio sin USF.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 4-7. Cálculo del throughput del radio bloque con los bits de spare incluidos.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 4-8. Cálculo del throughput del bloque de radio</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 4-9. Throughput máximo teórico (bit/s).</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 4-10. Canales lógicos GPRS.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 5-1. Probabilidades de Captura.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 5-2. Throughput teórico del sistema GPRS de multiframe-52.....</i>	<i>88</i>

1 Introducción

1.1 Sistemas de Redes Celulares

En los últimos años ha sido impresionante el crecimiento de la telefonía móvil, debido a la gran demanda de usuarios y servicios que se tienen. Hoy en día utilizamos nuestro teléfono celular no solo para realizar llamadas telefónicas sino para acceder a múltiples aplicaciones entre ellas la mensajería y el Internet.

Sin embargo, detrás de estos servicios hay una gran evolución y años de desarrollo en tecnologías celulares. Dicho crecimiento ha surgido principalmente por la demanda de los usuarios de nuevos servicios y mejoras en la calidad de los mismos. Por lo cual ha sido necesario que las tasas de transmisión sean mayores y los recursos de radio sean mejor aprovechados de tal forma que los costos no incrementen de forma exponencial para el proveedor y el cliente y poder satisfacer eficientemente las necesidades.

Los sistemas de telefonía celular que hoy en día se utilizan alrededor del mundo son aquellas que van desde la 2G (2ª. Generación) hasta la 3G (3ª. Generación), ya en algunos lugares. Pero entre estas dos surge una etapa más la 2.5 G o también conocida como la generación de transición.

En la primera etapa de 2G, el sistema GSM (*Global System Mobile*) utilizaba la transferencia por conmutación de circuitos lo cual derivó en una ineficiente utilización de los recursos de radio. Ya que una vez que se realizaba la conexión entre un par de usuarios, el canal quedaba ocupado hasta que finalizaba la conexión sin importar si en dicho periodo había tiempos muertos de transmisión de datos. Debido a la mala utilización de los canales, el resto de usuarios tenía que esperar un mayor tiempo para poder realizar una conexión exitosa y transmitir sus datos. Adicionalmente al usuario le era facturado todo el tiempo de conexión independientemente de que hiciera o no uso del mismo.

Una de las tecnologías que se han desarrollado con buenos resultados y que se expande actualmente en Latinoamérica y el resto del mundo es el GPRS (*General Packet Radio Service*). Este es un servicio que se basa en la conmutación de paquetes y la transmisión de datos por ráfagas (*burst*) de manera tal, que el canal es liberado mientras no se transmite. Esto permite la transmisión de datos de otro usuario, y los recursos de red son mejor utilizados y la facturación al usuario solo se hace por dato transmitido y no por tiempo utilizado como ocurría anteriormente.

En GPRS es posible reducir los costos y aumentar las velocidades de transmisión. También debido a que el canal puede ser utilizado por distintos usuarios a la vez, el retardo del sistema se reduce drásticamente.

Al aumentar las velocidades de las tasas de transmisión es posible introducir aplicaciones cuya transmisión es poco frecuente, independientemente de la cantidad de datos.

Entre estas aplicaciones encontramos:

- Aplicaciones interactivas del tipo Internet.
- Transmisiones intermitentes, con frecuencia regular pero que tiene tiempos muertos de transmisión y,
- Aplicaciones cuyo ancho de banda es más demandante, tales como imágenes y en algunos casos video.

Aunque cabe mencionar que para el caso de video y otras aplicaciones en tiempo real, la velocidad de transmisión es aún poco eficiente. Actualmente se estudian redes cuya capacidad es aún mayor y que se pretende se integren a estándares de redes inalámbricas (Wi-Fi, WiMax). Estas tecnologías permitirán al usuario la utilización de distintas redes y estándares de forma integral sin perder la calidad del servicio.

1.2 Definición del problema

Como se mencionó anteriormente con la tecnología GPRS, se pretende hacer un uso eficiente de los recursos de red y mejorar la calidad del servicio que recibe el usuario.

Para lo cual, en primera instancia debemos conocer la arquitectura de la red y el protocolo correspondiente para poder hacer el análisis básico requerido del sistema. Y así poder obtener el *throughput* y *delay* del mismo, ya que son parámetros elementales de medición del rendimiento de la red.

Sin embargo pocos son los desarrollos que se hacen al respecto. En general en los estudios o documentos, solo se nos muestra información sobre como opera el protocolo pero pocos son aquellos que hacen referencia a el origen de ese funcionamiento. Es por esto que surge la necesidad de desarrollar un modelo matemático que en base a ciertos parámetros definidos nos permitan calcular tanto el *throughput* como *delay* del sistema.

De igual forma se calculará la eficiencia de la red en las distintas capas del stack de protocolos, de manera que podamos observar el impacto de la codificación en la misma.

1.3 Justificación e hipótesis

Hasta el momento no se ha encontrado información de tesis que desarrollen un modelo para encontrar dichos parámetros de la red. Y de acuerdo a la información conocida sobre el sistema GPRS en esta tesis proponemos hacer un estudio basado en un documento previo desarrollado por Vikrant A. Chitre [39] sobre el desempeño de GPRS. En esta tesis se pretende reproducir dicho estudio y encontrar resultados similares. En esta tesis se desea mostrar que a mayor cantidad de usuarios y slots de contención utilizados, *el throughput* de la red aumenta, sin embargo el *delay* también aumenta sobre todo cuando el tamaño del mensaje a transmitir es de mayor longitud.

Por otro lado se calculará la eficiencia del protocolo, de tal forma que mostremos como la codificación influye en la transmisión de los datos, así como que éste impacto disminuye entre mayor es la longitud del mensaje a transmitir.

1.4 Objetivos

Desarrollar un modelo analítico a través del cual podamos determinar el comportamiento, en términos del *throughput* y *delay*, del canal GPRS. Para esto se toma en cuenta que los usuarios deben iniciar una sesión antes de contender por los recursos para la transmisión de sus datos y se usa como parámetro el número de *slots* de contención a utilizar en el sistema.

Por otro lado, basándonos en el proceso de encapsulamiento y los esquemas de codificación de la red, obtener el porcentaje de eficiencia volumétrica en cada una de las capas del *stack* de protocolos.

1.5 Contribuciones

Se desarrolla un tema de tesis que nos permite obtener un enfoque distinto de las redes de telefonía celular.

Se pretende dar un paso más al simple desarrollo de información, estableciendo un modelo matemático para el análisis de un sistema celular de tal forma que se comprenda como es desarrollado una estándar de tecnología celular y sus especificaciones y no solo se vea desde un punto de vista informativo.

Además se pretende que este desarrollo sirva como modelo para futuros análisis de sistemas celulares e inclusive del mismo sistema GPRS pero introduciendo algunas aplicaciones de datos.

1.6 Estructura de la tesis

La tesis que se presenta se encuentra estructurada de la siguiente forma:

En el segundo capítulo se comienza con los antecedentes de la telefonía celular y se continúa con una descripción general de los conceptos fundamentales de la telefonía celular y los sistemas que conforman una red celular, así como de algunos procesos que se ejecutan al hacer uso de los diferentes servicios de telefonía y datos móviles.

En el tercer capítulo se proporciona un panorama de lo que han sido las distintas generaciones de telefonía celular, desde la primera generación hasta las expectativas que hoy en día se tienen respecto de los sistemas de 4^a. y 5^a. generación. Se informa detalladamente acerca de la operación, técnicas de acceso y los elementos de red que introduce y utiliza cada una de las generaciones así como los servicios que se ofrecen en cada una de ellas. Además se listan los estándares que se han producido en cada generación de telefonía móvil y sus características distintivas.

En el cuarto capítulo se introduce al sistema celular digital GSM describiendo su arquitectura de red, modelo de operación e interfaz de aire. En este capítulo también introducimos al siguiente estándar de telefonía celular digital perteneciente a la generación 2.5 G, el GPRS, tema central de este documento, detallando su funcionamiento, topología de red, codificación, protocolos y modelos de transmisión.

En el quinto capítulo se desarrolla el modelo matemático que nos permite sustentar el análisis del desempeño del *throughput* y *delay* de la red GPRS. Se explica el funcionamiento de este modelo y finalmente se muestran los resultados obtenidos de la simulación, mediante las gráficas correspondientes al *throughput* y *delay* del sistema en términos de ciertos parámetros (número de usuarios, número de *slots* de contención, longitud del mensaje a transmitir).

En este mismo capítulo, se muestra el modelo de encapsulamiento ocurrido en el *stack* de protocolos de la red GPRS y se determina la eficiencia volumétrica en cada capa del *stack* para cada uno de los 4 esquemas de codificación posibles.

Finalmente en el último capítulo se listan las conclusiones obtenidas de este estudio.

2 Sistema de Radiotelefonía Celular

2.1 Antecedentes

El hombre a lo largo de la historia ha tenido la necesidad de comunicarse de forma eficaz. Por tanto, ha desarrollado diversos sistemas de comunicación cuyo objetivo es mantenerlo informado a pesar de las distancias, en el menor tiempo posible.

Con el descubrimiento de la corriente eléctrica se crearon nuevas incógnitas sobre la acción eléctrica. Faraday en 1835, observó que la corriente eléctrica se propagaba como si existieran partículas discretas de electricidad, lo cual suponía un nuevo camino de investigación en esta área. Pero las investigaciones de Faraday no quedaron en el olvido, a treinta años de que Faraday las concluyó, James Clerck Maxwell traduce sus observaciones a lenguaje matemático y demuestra que los principios de la transmisión de ondas eléctricas a distancia eran posibles.

Para 1888 Hertz emprende la tarea de hacer investigaciones sobre las ideas de Maxwell, logrando confirmarlas y dejando entrever la posibilidad de producir ondas eléctricas a distancia para después captarlas con los aparatos adecuados. De esta manera se hace la primera tentativa de radio comunicación por medio de ondas electromagnéticas y el primer resultado práctico del que había de surgir la totalidad de los experimentos que llevaron hasta el perfeccionamiento de la telefonía sin hilos. Logrando así que el descubrimiento de Hertz comprobara la existencia de las ondas electromagnéticas y sus propiedades análogas a las ondas luminosas, confirmando de esta forma la teoría de Maxwell.

Samuel Morse, patentó desde 1837 el telégrafo, medio de comunicación que durante mucho tiempo fue el más rápido y aceptado en el mundo, pero era limitado por el tiempo y la eficiencia de como se tendía el cableado. Sin embargo las investigaciones para mejorar las comunicaciones a pesar de la distancia seguían siendo de gran importancia para los científicos, y fue para 1869 que la idea de transmitir más que electricidad por medio del cableado telegráfico que se tenía en esa época, hizo que Elisa Gray y un socio fundaran la *Western Electronic Company*, para realizar investigaciones y tratar de transmitir voz. Sin embargo, Alexander Graham Bell logró perfeccionar esta idea antes, y patenta el teléfono logrando pronunciar la primera frase completa transmitida por cable. El sistema de comunicaciones sufre entonces un avance descomunal, las comunicaciones instantáneas que permitían la transmisión de voz hacían que con esto surgiera la incógnita de que la distancia pudiera dejar de ser un problema. La forma de comunicación actual comenzaba a vislumbrarse.

Debido al aumento de población y la demanda del servicio telefónico, en 1884 se abre la primera línea comercial entre Boston y New York. Un año después la Unión Telegráfica Internacional prepara las primeras normas internacionales de telefonía y se funda la *American Telephone and Telegraph Company*, AT&T, matriz del sistema Bell. En tan sólo un año, dicha compañía, ya comenzaba a ofrecer el servicio privado de líneas telefónicas, y es la encargada de desarrollar por mucho tiempo los avances más importantes en telecomunicaciones.

La comunicación vía telefónica siguió en aumento, las investigaciones y descubrimientos orientados hacia ésta se incrementaban. En 1889, Almon B. Strowger inventa el conmutador automático de telefonía. En 1891, se patenta la primera central automatizada mecanizada con la cual se prescindía de la operadora para poder llevar a cabo las llamadas.

Strowger crea la *Strowger Automatic Exchange Company* y se convierte en la primera central telefónica que no utiliza operadoras para poder establecer las conexiones de las llamadas. El sistema inventado se instaló por primera vez en La Porte (EE.UU.), en 1893, y en los siguientes meses varias ciudades siguieron su ejemplo.

Pero, no sólo el teléfono recibía atención, gracias a las investigaciones realizadas en lo concerniente a las ondas electromagnéticas, para 1900 se inventa la radio en Amplitud Modulada (A.M.), y en diez años se inventa el tubo de vacío.

En 1906, Reginald Fessenden logró crear la *Radiotelefonía*, al realizar la primera transmisión de la voz humana sin depender de los hilos y alcanzando un radio de 45 km. Sus aportaciones e investigaciones dieron origen al sistema «*dúplex*» de radiotelefonía y al método heterodino de recepción. Las aportaciones de Fessenden dieron fin a las comunicaciones interpersonales, para, una vez terminada la Primera Guerra Mundial, dar inicio a una etapa en la radiodifusión en la que ésta estuvo al alcance de miles de personas.

Todos los sistemas de radio comunicación utilizaban el espectro electromagnético, el cual es descrito como "*La forma de oscilamiento de energía eléctrica y magnética que se conduce a través del espacio sin los beneficios de interconexiones físicas*". El espectro electromagnético es en teoría ilimitado. En realidad, es un recurso natural limitado tanpreciado que es utilizado lo más eficientemente posible, pero no siempre fue así. Al igual que con muchos otros recursos, el espectro electromagnético ha sufrido de modificaciones para poder ser utilizado en toda su capacidad de la mejor manera. Al principio cualquiera podía utilizarlo, pero éste era ocupado por muy pocos y esos pocos lo utilizaban en toda su capacidad. Con esta facilidad de uso el radio espectro se fue congestionando cada vez más provocando con esto la degradación del servicio y la interferencia, todo debido a que muchos usuarios transmitían y recibían información en una manera descoordinada.

El radio espectro tuvo que ser reorganizado y sistematizado, pero tenía que ser esta reestructuración a un nivel nacional, regional e internacional, ya que las ondas electromagnéticas no se detienen por área geográfica ni por fronteras políticas. Debido a esto, la principal institución de esa época sobre coordinación en esta materia, que era la Unión Telegráfica Internacional (ITU- *International Telegraphic Union*) fue la encargada de esta regulación. La ITU determinó que era de gran importancia asegurar el desarrollo y mantenimiento en la eficiencia de la red mundial de telecomunicaciones y para ello tenía que llevar a cabo la tarea de administrar el espectro de manera eficiente. Esto lo logró creando una distribución donde se designaban divisiones en el espectro formando sub-bandas de frecuencia y asignando a cada una de ellas los diferentes usos y servicios de radio transmisión.

Los ingenieros del sistema Bell diseñaron un teléfono bidireccional capaz de comunicar dos aviones en vuelo. Para 1919 se inventa la radio de onda corta y la primera estación radial aparece al siguiente año. En 1920, Estados Unidos adquiere la hegemonía de las comunicaciones telefónicas con la creación de la *International Telephone and Telegraph* (ITT), fundada por los hermanos Hernand y Sosthenes Behn. La ITT acabó, en un espacio de tiempo no superior a quince años, siendo la empresa líder de las telecomunicaciones internacionales. Su momento de despegue fue en 1925 cuando la AT&T, como consecuencia de la aplicación de las leyes *antitrust* de los Estados Unidos, se vio obligada a vender a la ITT la *International Western Electric*, que monopolizaba la comercialización del *sistema Bell* en el exterior de los Estados Unidos, por 30 millones. Tras este acuerdo trascendental, la ITT contó con el apoyo financiero del *National City Bank* y de la *Banca Morgan*, con lo que la expansión internacional de la ITT fue inmediata y espectacular, sobre todo en Latinoamérica y Europa.

Ante la necesidad de lograr mejores comunicaciones en 1924 se logra transmitir imágenes a través del teléfono y ya hay más de quince millones de usuarios suscritos al llamado "Sistema Bell", lo cual comprueba la gran necesidad del ser humano a estar comunicado y de que este tipo de comunicación sea en poco tiempo sin importar las distancias.

Como en Estados Unidos las comunicaciones iban en aumento y no estaban completamente reglamentadas, bajo la aprobación del presidente Roosevelt, entra en vigor el "Acta de Comunicaciones" y se funda en 1934 la primera ley de telecomunicaciones, con la cual se creaba la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC). Esta comisión tiene bajo su jurisdicción la regulación del mercado telefónico interestatal, así como la distribución de las radio frecuencias y la limitación de la potencia de transmisión. También está bajo su cargo el aprobar o desaprobar las licencias para los servicios al público en telefonía y telegrafía. El sistema telefónico estadounidense ya tenía para 1941 más de ochenta y dos millones de llamadas diarias.

El auge real de los sistemas públicos bidireccionales de radiocomunicaciones móviles tuvo lugar justo después de la segunda guerra mundial, cuando el uso de la modulación de frecuencia y de la tecnología electrónica, como la válvula de vacío, permitieron el desarrollo de un servicio de telefonía a escala real para vehículos. El primer servicio telefónico móvil real nació oficialmente en St. Louis (Missouri, EE.UU.) en 1946. El sistema usaba un único transmisor de radio en el techo de un edificio. Se usaba un único canal, de este modo requería que se presionara un botón para hablar, y que se soltara para escuchar. Este sistema que transmite en un sólo sentido a la vez se conoce como *half-dúplex*. Se usa todavía en los modernos sistemas de radio de Banda Ciudadana (CB, *City Band*) de estos días, utilizados por la policía y los operadores de taxis.

En 1947, adelantándose por mucho a sus competidores, los laboratorios Bell presentan públicamente el primer transistor, el cual reemplaza de manera eficiente las válvulas de vacío o bulbos y se hacen las primeras concepciones para la telefonía celular.

Es creado el Sistema Telefónico Móvil (MTS, *Mobile Telephone System*) como sistema móvil público en el rango de 35 a 40 MHz. Este mismo año la ONU toma a la ITU como organismo especializado en telecomunicaciones de esta dependencia, convirtiéndose en la Unión Internacional de Telecomunicaciones. En 1949 se autorizan 6 canales más para las frecuencias portadoras, se incrementa el número de canales de 6 a 11 y su ancho de banda se reduce a 30 KHz.

Las primeras redes móviles de telefonía se operaban manualmente; era necesaria la intervención de un operador para conectar cada llamada a la red fija. Además, los terminales eran muy voluminosos, pesados y caros. El área de servicio estaba limitada a la cobertura de un único emplazamiento de transmisión y recepción (sistemas uniceulares). Había muy poco espectro de radio disponible para este tipo de servicios, dado que éste se asignaba fundamentalmente a propósitos militares y a radiodifusión, en particular, televisión. En consecuencia, la capacidad de los primeros sistemas era pequeña y muy saturada a pesar del alto costo de los terminales. La calidad del servicio empeoró rápidamente debido a la congestión y la capacidad de procesar llamadas, se caía algunas veces hasta paralizar la red.

En un adelanto de lo que serían las comunicaciones móviles, surgen en 1957 los "pager" al operar el sistema que envía señales radiales a estos receptores portátiles de bolsillo. Para 1964 deja de operar de manera manual el MTS y lo sustituye el Sistema de Teléfonos Móviles Mejorado (IMTS-*Improved Mobile Telephone System*) que opera de manera automática y es un sistema *full-dúplex*. Sin embargo, las frecuencias que utilizaba eran limitadas por lo que no podía soportar un gran número de usuarios.

Entre 1950 y 1980 los sistemas evolucionaron hasta automatizarse y los costos disminuyeron gracias a la introducción de los semiconductores. La capacidad se incrementó un poco, aunque aún era demasiado escasa para la demanda existente: la radiotelefonía pública seguía siendo un lujo para unos pocos. Durante los años 70, la integración a gran escala de dispositivos electrónicos y el desarrollo de los microprocesadores abrió las puertas a la implementación de sistemas más complejos. Dado que el área de cobertura de una antena está fundamentalmente limitada por la potencia de transmisión de las estaciones móviles, los sistemas se plantearon con varias estaciones receptoras para una única estación transmisora. Se permitía así la cobertura de un área mayor, a costa de una mayor complejidad en la infraestructura. Pero la verdadera revolución se produjo con los sistemas celulares, donde hay numerosos emplazamientos que tanto transmiten como reciben, y sus respectivas áreas de cobertura se solapan parcialmente.

En lugar de intentar incrementar la potencia de transmisión, los sistemas celulares se basan en el concepto de reutilización de frecuencias: la misma frecuencia se utiliza en diversos emplazamientos que están suficientemente alejados entre sí, lo que da como resultado una gran ganancia en capacidad. Por el contrario, el sistema es mucho más complejo, tanto en la parte de la red como en las estaciones móviles, que deben ser capaces de seleccionar una estación entre varias posibilidades. Además, el costo de infraestructura aumenta considerablemente debido a la multiplicidad de emplazamientos. El concepto celular se introdujo por los laboratorios Bell y se estudió en varios lugares durante los años 70.

Gracias a la progresiva miniaturización, durabilidad e implementación en los equipos móviles el transistor ofrece facilidades para que los sistemas móviles sean cada vez mejores y con mayor tecnología. De esta manera empieza la gran revolución en los sistemas de comunicación celular en el mundo. Martin Cooper fue el pionero en esta tecnología, a él se le considera como "el padre de la telefonía celular" al introducir el primer radioteléfono en 1973 en los Estados Unidos mientras trabajaba para Motorola; pero no fue hasta 1979 en que aparece el primer sistema comercial en Tokio Japón por la compañía NTT (*Nippon Telegraph & Telephone Corp.*)

En 1981 en los países Nórdicos se introduce un sistema celular similar a AMPS (*Advanced Mobile Phone System*) de los Estados Unidos, precedido por el ya conocido *IMTS*. Por otro lado, en los Estados Unidos gracias a que la entidad reguladora de ese país adopta reglas para la creación de un servicio comercial de telefonía celular, en octubre de 1983 se pone en operación el primer sistema comercial en la ciudad de Chicago. A partir de entonces en varios países se diseminó la telefonía celular como una alternativa a la telefonía convencional alámbrica. La tecnología inalámbrica tuvo gran aceptación, por lo que a los pocos años de implantarse se empezó a saturar el servicio y hubo la imperiosa necesidad de desarrollar e implementar otras formas de acceso múltiple al canal y transformar los sistemas analógicos a digitales para darle cabida a un mayor número de usuarios. Es así como se empieza a dar el proceso de evolución de la telefonía celular.

2.2 Conceptos básicos.

En los sistemas de telefonía móvil celular la zona de cobertura deseada se divide en zonas más pequeñas llamadas células, a las que se asigna un cierto número de radiocanales. A través de la historia, se han descrito una serie de sistemas que podrían englobarse dentro de este epígrafe.

No obstante, sólo se considerarán aquí aquellos sistemas que cumplan los siguientes objetivos:

- Gran capacidad de abonados.
- Calidad telefónica similar al servicio telefónico convencional.
- Utilización eficaz del espectro.
- Conmutación automática de radiocanales.
- Capacidad de expansión.
- Gran movilidad y accesibilidad
- Poder constituir una red de comunicaciones completa en sí mismos.
- Compatibilidad nacional e internacional
- Servicios portátiles y especiales
- Adaptabilidad para el tráfico denso

A continuación se describen los conceptos básicos, que deben estar bien claros al momento de hablar de telefonía celular. Aunque la mayoría de estas definiciones que se relatarán pueden aplicarse a otros sistemas de radiocomunicaciones, como es el caso del área o zona de cobertura, he decidido particularizar estos conceptos para el caso de una red celular; ya que éste es el sistema de nuestro interés.

2.2.1 Elementos de una red celular

Una red celular consiste tanto de secciones basadas en radio como en tierra. A tal red se la conoce comúnmente como red pública móvil terrestre (**PLMN** por sus siglas en inglés - *Public Land Mobile Network*). La red está compuesta de las siguientes entidades:

- Estación móvil (**MS** por sus siglas en inglés - *Mobile Station*): un dispositivo usado para comunicarse en una red celular.
- Estación transceptora base o radio base (**BST** por sus siglas en inglés - *Base Station Transceiver*): un transmisor/receptor usado para transmitir/recibir señales de la sección de radio de la red.
- Centro conmutador móvil (**MSC** por sus siglas en inglés - *Mobile Switching Center*): El corazón de la red el cual establece y mantiene las llamadas que se hacen en la red.
- Controlador de estación base (**BSC** por sus siglas en inglés - *Base Station Controller*): controla las comunicaciones entre un grupo de BSTs y un único MSC.
- Red de telefonía pública conmutada (**PSTN** por sus siglas en inglés - *Public Switched Telephone Network*): La sección terrestre de la red.

Las BSTs y su BSC controlantes, a menudo se refieren colectivamente como el subsistema estación base (**BSS** por sus siglas en inglés - *Base Station Subsystem*). Para usar en forma eficiente el espectro de radio, se reutilizan las mismas frecuencias en celdas no adyacentes. Una región geográfica se divide en celdas.

Cada celda tiene una BST que transmite datos a través de un vínculo de radio a las MSs dentro de la celda. Un grupo de BSTs están conectadas a una BSC. Un grupo de BSCs están a su vez conectadas a un MSC a través de vínculos de microondas o líneas telefónicas. El MSC se conecta a la PSTN, la cual deriva las llamadas a otras estaciones móviles o teléfonos terrestres.

La Figura 2-1 ilustra cómo estas entidades se relacionan unas con otras dentro de la red

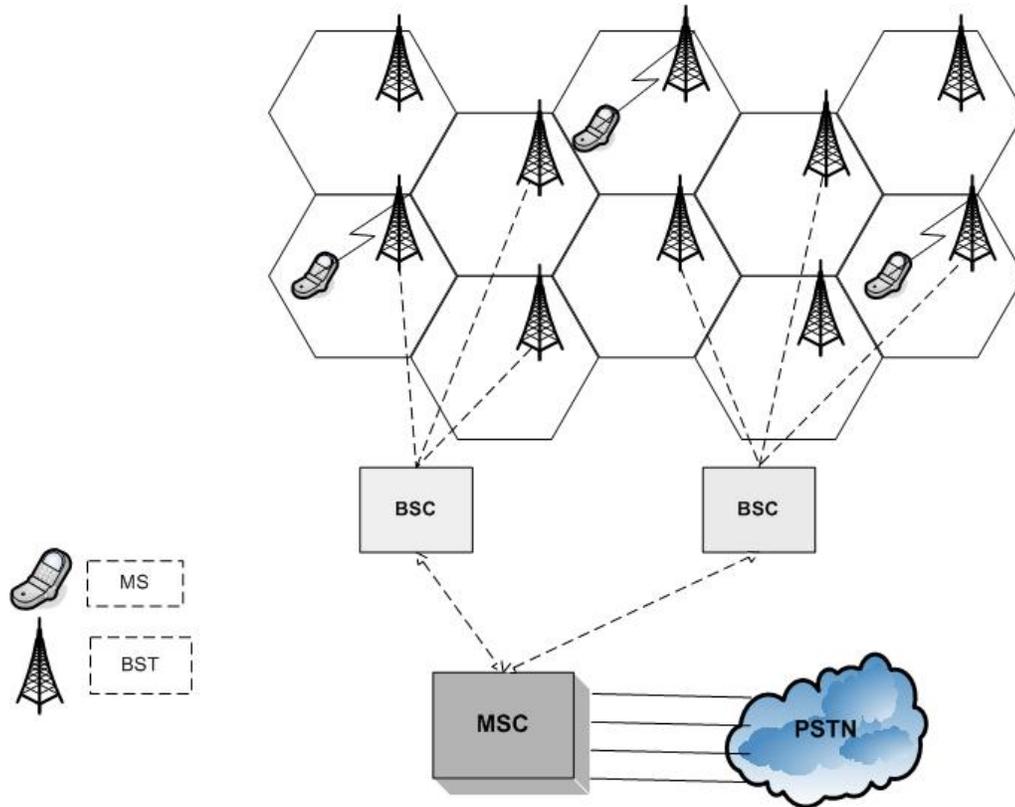


Figura 2-1. Sistema Celular

2.2.2 Proceso de llamada

La siguiente descripción de una estación móvil haciendo una llamada a otra estación móvil explica mejor la tecnología subyacente en un sistema de red celular.

Una estación móvil (MS) inicia una llamada enviando un pedido de inicio de llamada a su estación base (BST) más cercana. Este pedido se envía en un canal especial, el canal de control inverso, (RCC por sus siglas en inglés - *Reverse Control Channel*). La estación base envía el pedido, que contiene el número de teléfono de la parte llamada, al MSC. El MSC valida el pedido y usa el número para hacer una conexión a la parte siendo llamada a través de la PSTN. Primero se conecta a él mismo al MSC de la parte siendo llamada, luego el MSC instruye a las estaciones base y móvil que colocó la llamada para cambiar a los canales de voz. La estación móvil que inició la llamada está entonces conectada con la estación llamada usando canales de voz hacia adelante y hacia atrás sin usar (FVC, BVC por sus siglas en inglés - *Forward Voice Channel, Backward Voice Channel*)

Los pasos que tienen lugar cuando una estación móvil recibe un llamada entrante son como siguen:

Las estaciones móviles analizan continuamente el canal de control hacia adelante (FCC por sus siglas en inglés - *Forward Control Channel*) por señales de búsqueda desde las estaciones base.

Cuando un MSC recibe un pedido para una conexión a una estación móvil en su área, envía un mensaje de “*broadcast*” a todas las estaciones base bajo su control. Este contiene el número de la estación móvil que está siendo llamada. Las estaciones base luego emiten el mensaje en todos los canales de control hacia adelante (FCC). La estación móvil correcta reconoce la búsqueda, identificándose en el canal de control inverso (RCC). El MSC recibe el reconocimiento a través de la estación base, e instruye a las estaciones base y móvil a cambiar a un canal de voz sin utilizar. Se transmite entonces un mensaje de datos sobre el FVC, que le indica al teléfono móvil que suene. Los pasos explicados suceden lo suficientemente rápido como para que el usuario no experimente ninguna demora perceptible entre el pedido de inicio de una llamada y la llamada realmente establecida.

A continuación se describirán de manera más detallada los conceptos arriba mencionados y algunos otros que también son de suma importancia en la conformación y diseño de un sistema celular.

2.2.3 Célula o celda

Célula es cada una de las unidades básicas de cobertura en que se divide un sistema celular. Cada célula contiene un transmisor el cual puede estar en el centro de la célula, si las antenas utilizan un modelo de radiación omnidireccional; o en un vértice de la misma, si las antenas tienen un diagrama directivo. Además transmite un subconjunto del total de canales disponibles para la red celular a instalar. Cada célula tiene un número de radiocanales de frecuencia asignado, además de varios canales de tráfico, tendrá uno o más canales de señalización o control para la gestión de los recursos de radio y la movilidad de las estaciones móviles a ella conectados.

Las células son en teoría de forma hexagonal. La red se encuentra diseñada para que los tamaños de las células sean relativos al número de usuarios; por tanto, entre mayor número de usuarios, las células son más pequeñas y hay un mayor número de ellas para cubrir el área, como sería en las zonas urbanas; en las zonas rurales, las células son de mayor área y el número de ellas es menor.

2.2.3.1 “Cell-Splitting”

Cuando el número de usuarios se incrementa y se acerca al máximo número al que se puede dar servicio por célula a un punto tal que la calidad del servicio es afectada, las células pueden ser subdivididas en células más pequeñas, este proceso es conocido como *Cell-Splitting*. Si esto no se realiza de forma planeada, la “obstrucción” se puede incrementar. Esta obstrucción ocurre cuando un usuario desea hacer una llamada y el sistema está saturado y no puede hacer que ésta sea completada.

Una medida del cumplimiento del sistema telefónico es la medida de obstrucciones que ocurren dentro del sistema. Para prevenir la obstrucción en el sistema, desde la PSTN es ocupada la división de células. Esto también obedece a la demanda del área, si esta tiene una gran demanda, hay más número de células de menor tamaño, si esta no tiene un tráfico denso, es menor el número de células, y estas de mayor tamaño.

En principio, en el *Cell-Splitting* cada una célula tiene el mismo número de canales que en la célula original. Cada célula, por lo tanto, es capaz de soportar al mismo número de usuarios que la célula original. Sin embargo, es necesario reducir la potencia de salida del transmisor de la BST para minimizar la interferencia co-canal.

Por el proceso de división de células, el número potencial de usuarios puede ser incrementado sin la necesidad de un ancho de banda extra. Por supuesto, más BSTs son necesarias para cada nueva célula, pero el costo de la infraestructura adicional se ve compensado con el incremento de usuarios.

Una vez que estas células pequeñas tienen más suscriptores de los que pueden para proveer el servicio adecuado, otro *split* tiene lugar. De esta manera, una célula es dividida en cuatro células más pequeñas. (Las nuevas células son traslapadas en la célula adyacente sin dividir, ver *Figura 2-2*).

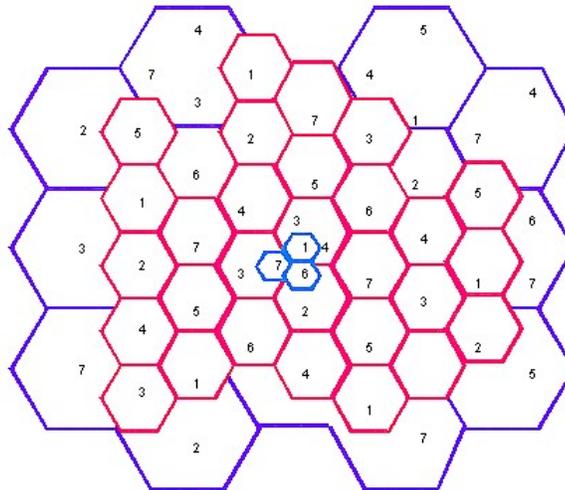


Figura 2-2. Dos niveles de Split

Existen restricciones de la división de células en el aspecto económico y práctico; el costo del sistema se incrementa si el tamaño de las células se decrementa. En la práctica, las células más pequeñas tienen un tamaño aproximado de 2 km de diámetro en áreas urbanas; las células en área rurales son típicamente de 15 km de radio.

Aún así, la dificultad de las tareas de ingeniería es tener células traslapadas para que no existan huecos en el área de cobertura, pero con la mínima interferencia.

En áreas urbanas densas las células son pequeñas de tamaño, la interferencia co-canal puede ser un serio problema. Este puede ser minimizado por el uso de antenas direccionales en la BST. Típicamente, tres o seis antenas son usadas, cubriendo un área de 120° o 60°. Asumiendo que sean tres antenas, cada BST sirve de manera eficiente tres células y el tamaño del cluster se incrementa de siete a veintiuno. El uso de antenas direccionales reduce el costo de infraestructura debido a que son muchas menos las BSTs requeridas; esto, en turno, facilita la dificultad de obtener sitios adecuados para las BSTs.

2.2.3.2 Geometría celular

Después de haber diseñado el patrón deseado de célula, incluyendo el espacio de separación para prevenir la interferencia co-canal, es necesario planear el correcto posicionamiento del equipo de la BST y la selección del equipo necesario para servir cada llamada, para lograr que se lleven a cabo las ventajas consideradas en el diseño de dicho patrón celular.

Para llevar a cabo este fin y poder hacer una planeación adecuada para el desarrollo del tráfico en la red celular, es conveniente utilizar un patrón estructurado geoméricamente en vez de usar un patrón irregular y amorfo. Esto principalmente porque una estructura irregular puede darnos funcionalidad en una primera etapa de desarrollo del sistema.

Sin embargo si consideramos el desarrollo del sistema a futuro y el incremento de tráfico y usuarios en la red, esta estructura resulta impráctica, debido al uso ineficiente que se hace del espectro radioeléctrico y la interferencia co-canal que se produce entre las células, provocando así el no poder llevar a cabo la reutilización de frecuencias.

Estas dificultades propician que el diseño del patrón celular se dirija hacia una estructura regular. Proponiendo en primera instancia el uso de una geometría circular con antenas omnidireccionales. Aunque un círculo es la forma de célula recomendada, teóricamente las consideraciones de la transmisión sugieren que una célula circular es un diseño impráctico debido a que este proporciona áreas ambiguas con cualquiera de las dos: múltiple difusión o no difusión.

Para asegurar una completa área de cobertura, una serie de polígonos regulares han sido adoptados en el diseño del sistema celular. De los polígonos regulares, escoger un triángulo equilátero, rectángulo y hexágono, elimina el problema de cobertura múltiple o huecos en el área de cobertura. Cualquiera de estos tres puede ser adoptado para el diseño de células. Estas estructuras de polígonos regulares hacen más fácil ver dónde una célula termina y empieza otra (ver *Figura 2-3*).

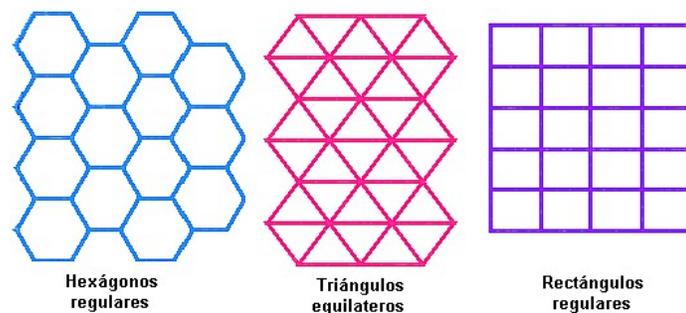


Figura 2-3. Estructuras de las células

Por razones económicas, el hexágono ha sido el escogido por las compañías. Para entender el motivo de esta decisión, hay que considerar el peor de los casos de los puntos en la red celular, el punto más lejano desde la BST. Es decir si asumimos que el centro de la célula es el punto de excitación, los puntos vértices son el peor caso ya que éstos poseen la distancia máxima desde el centro de la célula. Restringiendo la distancia desde el centro al vértice para R unidades para una calidad de transmisión satisfactoria, puede fácilmente demostrarse que el hexágono tiene la máxima área de cobertura, sobrepasando en un 20% al área de cobertura de la célula rectangular y en un 100% al área cubierta por la célula con geometría de triángulo equilátero como puede observarse en la *Figura 2-4*.

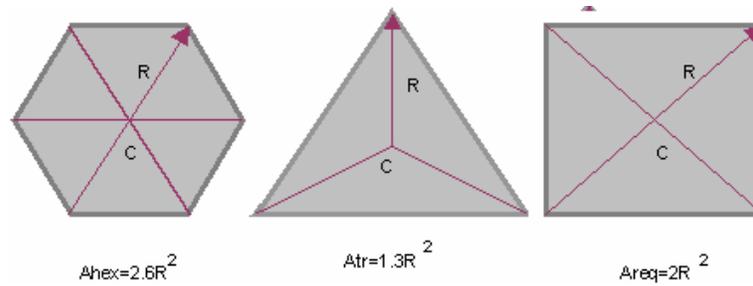


Figura 2-4 Área de las células

Consecuentemente, un área hexagonal requiere menos células, y por lo tanto son necesarias menos BSTs. Así, un sistema basado en la estructura celular hexagonal es justamente lo necesario para los propósitos de diseño desde un punto de vista analítico y teórico.

En la vida real, el hexágono podría ser visto idealmente como un círculo o un patrón de cobertura distorsionado. El área central de cobertura está dividida en seis sectores que corresponde al incremento de tráfico. La sectorización es conseguida por el uso de antenas direccionales en las BSTs.

2.2.3.3 Localización de la radiobase (BST)

Si suponemos un arreglo regular de BSTs, como el que se encuentra en la Figura 2-5 (a), podemos considerar entonces la asignación de dicha BST dentro de las células de dos maneras:

- La BST puede ser ubicada en el centro de la célula (Figura 2-5 (b)). En ese caso, las frecuencias asignadas a la célula son radiadas de forma omnidireccional, o bien,
- La BST se encuentra localizada en las esquinas de manera alternativa del hexágono regular (Figura 2-5 (c)). Para este caso, son utilizadas las antenas direccionadas a 120° y la BST emite energía en tres direcciones para suministrar asilamiento espacial entre tres células.

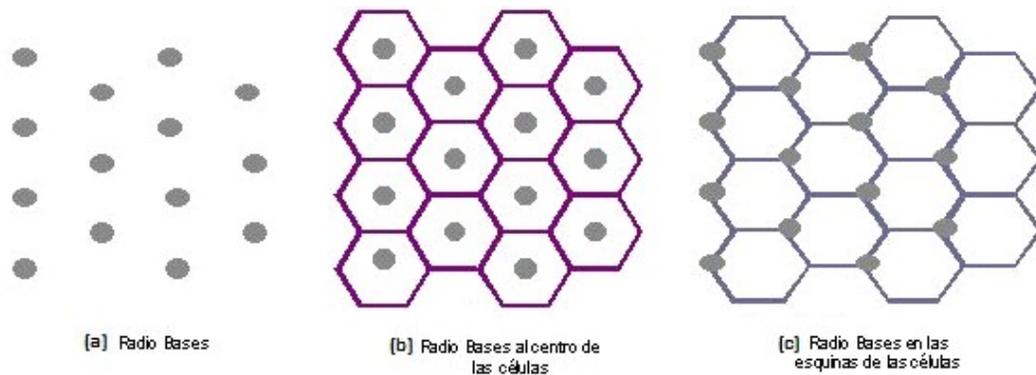


Figura 2-5 Localización de la BST

Para reducir el costo inicial de un sistema, las antenas omnidireccionales (*Figura 2-6*) son generalmente utilizadas en lugar de antenas direccionales. Conforme el sistema va evolucionando, los costos ahorrados pueden ser alcanzados por no incrementar el número de BSTs; las antenas omnidireccionales situadas en los antiguas BSTs, son remplazadas por antenas direccionales.

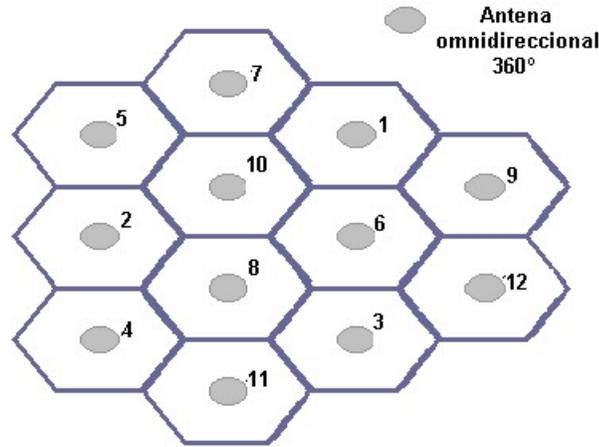


Figura 2-6. Ubicación de BST con antena omnidireccional

Hay dos tipos comunes de antenas direccionales utilizadas; cualquiera de las dos, la antena que emite a 120° o la antena sectorizada a 60°. Para las células sectorizadas con antenas a 60°, la ubicación de la BST original no tiene que cambiarse. (ver *Figura 2-7*).

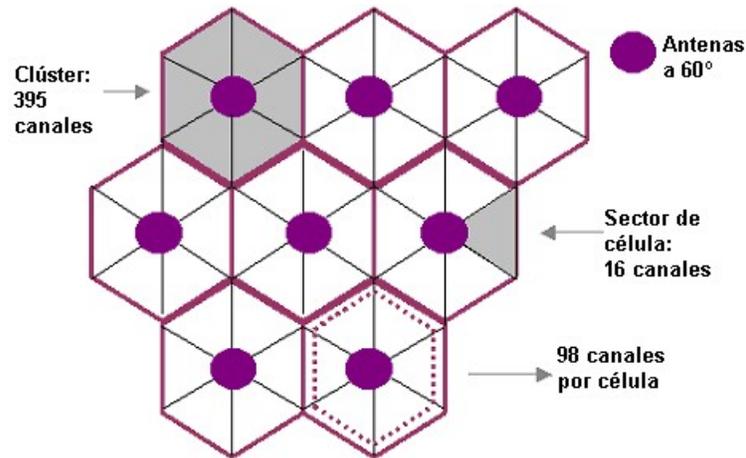


Figura 2-7 Ubicación de BST con antena sectorizada a 60° (cluster N=4)

2.2.3.4 Tolerancia en la ubicación de la BST.

Análisis reportados en el “*The Bell System Technical Journal*” indican que la tolerancia en la ubicación de la BST permitida es de al menos un cuarto del radio de la célula. También fue reportada que la tolerancia de la posición de la BST (la ideal contra la real) impacta la calidad de la transmisión de manera desfavorable (Ver *Figura 2-8*)

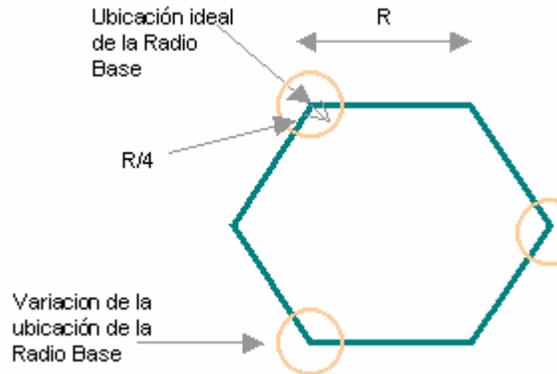


Figura 2-8 Tolerancia en la ubicación de la BST

2.2.3.5 Mínimo radio de la célula.

Como se vio en el apartado 2.2.3.1, el incremento en la demanda de tráfico, provoca que el sistema celular sufra la división de células o “*cell splitting*”.

Generalmente cuando se diseña la red, las células donde se considera habrá un mayor tráfico son divididas desde un principio, y posteriormente se prosigue en dividir el resto de las células grandes en células de menor tamaño. El proceso de división de células es semejante a dividir el radio original de la célula a la mitad. De esta manera, el área de la nueva célula es un cuarto del área de la célula original. Partiendo de que la capacidad de tráfico es proporcional al número de nuevas células, cada división incrementa la capacidad por un factor de cuatro. Así la máxima capacidad de tráfico del sistema puede ser fijada por el último tamaño de la célula. Considerando que cada división incrementa tanto la complejidad del sistema así como la capacidad, el costo por cliente sigue sin cambiar. Aunque la división de célula no ocasiona un costo adicional al usuario, este proceso no puede seguir indefinidamente debido que entre más pequeñas células se tengan se requerirán más procesos de “*handover*” de una célula a otra cuando el móvil se desplace dentro del área de cobertura. Esto hace necesario requerimientos de *hardware* adicionales al MSC. Combinando los requerimientos del MSC con los estrictos requerimientos de tolerancia de las BSTs a cerca de un cuarto de radio de la célula, el límite mínimo práctico de radio por célula actualmente utilizado es de una milla.

2.2.3.6 Máximo radio de la célula.

Ajustar el máximo radio para una célula dentro de la cual se mantenga una calidad satisfactoria de transmisión sin una indebida penalidad financiera es generalmente el objetivo durante la planeación inicial del sistema celular. El máximo radio de una célula es limitado por la potencia generada por la BST y el móvil, esto asociado con las ganancias de la antena y el contorno del terreno. Para una ganancia fija de la antena y un efecto de propagación fijo, el

radio de la célula puede ser incrementado para transmitir a mayor potencia. Esta técnica puede ser satisfactoriamente utilizada a alguna extensión y el tamaño del amplificador de potencia (PA) puede ser incrementado. No obstante, asociado con el incremento del tamaño del PA se tienen problemas de generación de ruido adicional, enfriamiento y consumo de la potencia. Obviamente, en el caso del móvil, el consumo de potencia no debe exceder ciertos valores. En las BSTs, tanto como en el móvil la generación de alta potencia impone especiales consideraciones de enfriamiento para el PA (también existe un límite de razón de refrigeración). En suma, un transmisor de alta potencia no es muy usado cuando el tráfico se incrementa y las células iniciales son divididas en células más pequeñas (las células de menor tamaño requieren menos potencia). Por otro lado, las antenas de las BSTs incrementan su ganancia proporcionando los mismos beneficios que incrementar la capacidad del PA. En un sistema celular, la ganancia efectiva puede ser incrementada por aumentos en el tamaño de la antena o en su altura. Comparado con el incremento en la capacidad del PA, consiguiendo una alta ganancia de la antena por colocar la antena en un lugar más elevado, es relativamente barato. La altura de la antena es normalmente limitada a 100 ' por encima del suelo, y la ganancia de la antena es limitada de 6-10 dBi (la ganancia en dB referida a una ganancia isotrópica como unidad). Asumiendo que el tamaño del PA, la ganancia de la antena y su altura en la BST están fijados, el máximo valor del radio de la célula puede llegar a ser determinado por el contorno de la razón S/N deseado.

Como se señaló oportunamente, la prueba subjetiva tiene que mostrar que la relación S/N de 18 dB proporciona una buena calidad de voz. El sistema AT&T AMPS requiere que la relación S/N de 18 dB debe exceder el 90 por ciento del área de cobertura celular. El resultado de una simulación conducida por *Bell Telephone Company* en Filadelfia muestra que para un radio de célula de 8 millas, la relación S/N a 18 dB es excedida por encima del 90% del área de cobertura.

Asumiendo que se empieza con el número redondo de 8 millas de radio para una célula como radio máximo, uno puede inicializar yendo a través de tres procesos de división de células para por último alcanzar el radio de la célula de una milla. Después de tres procesos de división de células, se vuelve impráctico.

2.2.4 Cluster o racimo

Lo forman un conjunto de células. Entre todas, agrupan la práctica totalidad de las frecuencias disponibles por la red celular. Sumando varios racimos es como se alcanza la cobertura final del sistema celular, reutilizándose de esta manera las mismas frecuencias en todos los racimos.

2.2.5 Cobertura

Se entiende por cobertura la zona desde la cual un terminal móvil puede comunicarse con las estaciones base y viceversa. La cobertura es el primer parámetro en que se piensa al diseñar una red de comunicaciones móviles: ¿en qué zonas se requiere dar servicio a las terminales móviles?

En primer lugar, la cobertura o el alcance de radio de una red es la composición del alcance de radio de la suma de todas sus estaciones base. A la hora de planificar una red, desde el punto de vista de la cobertura, el primer dato que se necesita saber es la zona que se desea cubrir, o zona de servicio.

Si se parte de esta única hipótesis, dado un área a cubrir, sería necesario un número de células tal que la suma de las áreas cubiertas por dichas células, a una altura determinada h y transmitiendo a su máxima potencia, fuera igual al área a cubrir.

Ahora bien, debemos tener en cuenta que no basta con realizar el cálculo de potencia en el sentido estación base a móvil; también es necesario que el móvil, en función de su capacidad de transmisión, pueda llegar hasta la estación de base. Por ello, la cobertura de la red debe planificarse teniendo en cuenta las condiciones de transmisión en las que se encuentra el móvil: es a lo que se denomina realizar un balance de enlace. Actualmente, las redes se diseñan teniendo en cuenta varios tipos de estaciones móviles: la máxima cobertura se ofrece para terminales instalados en vehículos, con antena exterior, y también se realizan provisiones para equipos portátiles en el exterior y en interior de vehículos, sin antena externa.

Debido a las características particulares del trayecto radioeléctrico, únicamente puede hablarse de cobertura en un sentido estadístico. Esto implica que, las áreas que se representan teóricamente cubiertas, lo están en un determinado porcentaje de ubicaciones y de tiempo. Existen gráficas, obtenidas de medidas empíricas sobre propagación, que muestran las correcciones en atenuación que se deben realizar para calcular correctamente el área de cobertura de un transmisor de radio, así como la probabilidad de cobertura asociada a dichas correcciones.

Hasta aquí todo es aplicable a casi cualquier sistema que tenga la radio como medio de transmisión. Lo que diferencia a un sistema celular es que, en zonas de alta densidad de tráfico, es capaz de utilizar más eficientemente que otros sistemas el limitado espectro radioeléctrico que tiene asignado. Esto implica un diseño de red radio denominado "celular", que es lo que le da el nombre al sistema.

El "truco" consiste en dividir el área a cubrir en un número de células suficientemente grande, que permita la reutilización de frecuencias. Estos conceptos serán explicados con más detalle más adelante en la sección 2.2.7 de éste capítulo. Desde el punto de vista de cobertura, lo que esta división en pequeñas células implica es que la cobertura de cada célula va a estar limitada por interferencia; es decir, el diseño se hará de forma tal que las células que utilizan los mismos radiocanales emitan a una potencia suficientemente baja para no interferirse entre si y, a su vez, no interferir a las estaciones móviles a los que están dando servicio.

En definitiva, el máximo alcance de una célula sólo se podrá conseguir en lugares de poca densidad de tráfico, que no son los más adecuados para este tipo de sistemas.

2.2.6 Capacidad

Es la cantidad de tráfico que puede soportar este tipo de sistemas. El diseño de una red celular está pensado para soportar una gran capacidad de tráfico, gracias a que se comparten los canales y a la subdivisión celular (*cell-splitting*).

La capacidad por cada bloque de canales distribuido en una célula se calcula mediante la aplicación de la fórmula de Erlang¹, es decir, como un sistema de llamadas perdidas (sin colas), en el cual, una línea permanentemente ocupada corresponde a 1E y una línea permanentemente libre corresponde a 0 E. La palabra Erlang significa *Extra Relatively Language*.

¹ Erlang fue un matemático danés (1878-1929) inventor de la teoría del tráfico telefónico. Su nombre vino a denominar la unidad adimensional que expresa la intensidad o densidad del tráfico telefónico "E" y de sus modalidades.

El Erlang B es la fórmula de ingeniería de tráfico telefónico usada cuando el tráfico es aleatorio y se pierden las llamadas (es decir, este es el que utiliza el sistema celular). El Erlang B asume el bloqueo de llamadas y las distribuye automáticamente hacia otra ruta, haciendo desaparecer el bloqueo. El sistema debe ser capaz de ofrecer el servicio a varios miles de unidades móviles en el área de cobertura con un número organizado de canales.

También existe el Erlang C, esta fórmula de ingeniería de tráfico telefónico es usada cuando el tráfico es aleatorio y se mantienen las colas. El Erlang C asume todas las llamadas, reteniéndolas hasta que una línea esté disponible.

Matemáticamente, el Erlang se define como:

$$E = \lambda \cdot th \quad (1)$$

Donde,

λ = número de llamadas entrantes en una unidad de tiempo (*arrival rate*) expresado en llamadas/hora.

th = es el promedio del tiempo de espera (holding) expresado en horas por llamada.

Por tanto 1 Erlang= 1 línea ocupada en una hora

Existen otras unidades comunes para la intensidad del tráfico. Se puede determinar el tráfico en términos de erlangs y el tráfico expresado en unidades de llamadas (UC- *Call Unit*) o su término sinónimo (HCS), abreviado como CCS. El erlang, como unidad de tráfico represente un canal ocupado continuamente por la duración de una hora. La relación entre erlangs y las unidades CCS se derivan de los 3600 segundos que existen en una hora. Otra unidad de tráfico, menos popular, es: unidad de tráfico (TU- *Traffic Unit*) y el *Equated Busy Hour Call* (EBHC). La intensidad cuando es expresada en CCS, HCS y UC representa el promedio de llamadas por hora en una base de tiempo de 100 segundos. EL EBHC asume la representación del tiempo de holding como 2 minutos. La relación entre CCS, EBHC, y erlang es:

- 1 CCS = una llamada por 100 segundos = una llamada por 1/36 hora = 1/36 erlang
- 1 EBHC = una llamada por 120 segundos = una llamada por 1/30 hora = 1/30 erlang

La capacidad de tráfico que aporta un sistema de tipo celular es función del número de canales utilizado, o ancho de banda disponible, del tamaño de las células y de la configuración en racimos o clusters. La capacidad será mayor cuanto mayor ancho de banda se disponga, cuanto menor sea la célula y cuantas menos células sean necesarias por cluster. Este último parámetro estará fuertemente ligado a la relación de interferencia co-canal que el sistema sea capaz de soportar. Respecto al tamaño de la célula, este estará limitado por la capacidad del protocolo de gestión de la movilidad y por la velocidad a la que se desplacen las estaciones móviles en la zona de servicio.

El diseño de la capacidad de los sistemas se realiza por zonas, tomando cada estación de base independientemente, suponiendo el caso de tráfico más desfavorable; es decir, el tráfico en la hora cargada.

2.2.7 Reuso de frecuencias

Esta es la técnica que permite diferenciar a los sistemas de concentración de canales frente al resto. Se trata de tomar todo el grupo de frecuencias asignado a la red y, dividiendo el grupo en varios subgrupos - células - y ordenándolo según una estructura celular – racimo.

Se pueden construir grandes redes con las mismas frecuencias sin que estas interfieran entre sí. Es decir, el reuso de frecuencia en los canales discretos asignados para células específicas implica que dichas frecuencias asignadas a una célula pueden ser usadas de nuevo en cualquier célula con una separación de la célula con esas frecuencias, por una distancia suficiente como para prevenir la interferencia co-canal que deteriora la calidad en el servicio (ver *Figura 2-9*).

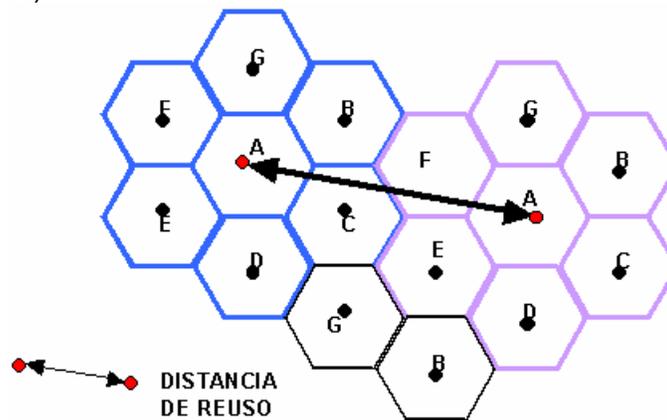


Figura 2-9 Reuso de frecuencias entre dos clusters adyacentes

Conforme el número de usuarios aumenta, los canales asignados originalmente a la célula pueden ser continuamente reasignados, con el propósito de satisfacer la demanda de los usuarios. El uso múltiple del mismo canal en células con una separación geográfica asegura que el espectro sea utilizado de manera eficiente. Para obtener el número de reutilización de frecuencias (N) se lleva a cabo la Planeación de Frecuencias. Generalmente se utiliza el Plan $N=7$ que es un *cluster* de 7 células. Otros arreglos son posibles y del tamaño de los *clusters* determina la distancia de separación entre células con reuso de frecuencias, sin embargo en caso de ser necesario, un número de canales limitado puede ser asignado a cada célula.

2.2.8 Interferencia co-canal

Es la interferencia causada por las células que reutilizan la misma frecuencia nominal.

2.2.9 Señalización

Por señalización se entiende toda comunicación dedicada a controlar los recursos del sistema para permitir la comunicación. Al hablar de comunicaciones celulares, se va a tratar de forma diferente la señalización asociada a la transmisión de radio y la relativa a la propia estructura de red. Ambos "tipos" de señalización sirven para los mismos propósitos, y sólo se diferencian por el tipo de entidades a las que ponen en comunicación.

Funcionalmente, se podría distinguir entre:

- señalización destinada a la gestión de los recursos de radio;
- señalización destinada a la gestión de la movilidad; y,
- señalización destinada al establecimiento de la comunicación, que, además, puede ser común con otros sistemas de comunicación y, en particular, debe ser compatible con las redes fijas a las que las redes celulares se conectan.

Cuando un usuario móvil realiza una llamada, el contacto inicial se realiza a través del canal de control. La señalización se realiza intercambiando paquetes de datos (modulados en FSK) que ocupan la totalidad del canal de control. La BST asignará un canal de voz (una pareja de frecuencias) a la nueva conversación y ambos, BST y terminal móvil, conmutarán al canal de voz mientras dure la conversación.

Para realizar tareas de supervisión, se envían dos tonos dentro del canal vocal pero fuera de banda:

- El primero es el SAT (*Supervisory Audio Tone*), un tono que es enviado por la BST y que debe ser devuelto por el terminal móvil mientras la conversación está en curso. La pérdida de potencia en la recepción del SAT le indica a la BST que la señal es muy débil, bien por acercarse a la frontera de la célula (por tanto se deberá proceder a un *handover*), o bien por otras razones (*fading*, desconexión, abrupta, etc...).
- El segundo es el ST (*Signaling Tone*) que se usa, por ejemplo, al final de una conversación para indicar que el terminal ha sido colgado.

Cuando se pierde el SAT puede desencadenarse el proceso de *handover*. Para ello la MSC pide a las BST adyacentes que monitoricen el nivel de la señal del canal de voz correspondiente, asumiendo que el móvil ha entrado en la zona de cobertura de aquella BST cuya señal sea recibida con mayor amplitud. Si la conexión es posible en la nueva BST (quedan canales sin usar) la MSC, a través de la BST, le indicará al móvil la nueva frecuencia a utilizar. Para ello, se interrumpe la señal de voz por un momento (unos 400 ms) y se le envía un mensaje de señalización al móvil. Esta interrupción es apenas distinguible durante una conversación, pero si se están transmitiendo datos se producirán una pérdida de información. Esta es una de las razones que ha llevado a la introducción de sistemas más avanzados como GSM.

2.2.10 Proceso de cambio de BST (*Handover*)

Es como se denomina al proceso de pasar una comunicación de un mismo móvil de un canal a otro. Es lo que diferencia a un sistema celular de otro tipo de sistemas de radiocomunicaciones de concentración de enlaces.

En función de la relación entre los canales origen y destino de la comunicación, los *handover* (también conocidos como "*hand off*") pueden clasificarse en:

- *handover* intercelular, si el canal destino se encuentra sobre otra frecuencia distinta a la del origen, pero en la misma célula;

- *handover* interBSC, cuando hay cambio de célula pero ambas células se encuentran dentro del mismo sistema controlador de estaciones base;
- *handover interMSC*, cuando hay cambio de célula y de controlador de estaciones base (BSC), pero ambos BSC dependen de la misma central de conmutación móvil (MSC); y, finalmente, *handover* entre MSCs, cuando hay cambio de célula y ambas células dependen de MSCs distintas.

2.2.11 HLR

Son las siglas de "Home Location Register" o base de datos donde se contiene toda la información del usuario pertinente para la provisión del servicio de telefonía móvil. Los sistemas de altas y bajas de los operadores actuarán contra esta base de datos para actualizar las características del servicio de cada cliente. También hay en el HLR información actualizada sobre la situación actual de sus estaciones móviles.

2.2.12 VLR

Corresponde a las siglas "*Visitor Location Register*" o base de datos donde se contiene toda la información del usuario necesaria para la provisión de los servicios durante la utilización de los mismos. El VLR tiene una copia de parte de los datos del HLR, referidos a aquellos clientes que se han registrado en la zona controlada por dicho VLR.

2.2.13 Área de localización

Está formada por un conjunto de células, y determina el área donde se encuentra el móvil y las células a través de las cuales se emitirá un mensaje de búsqueda para este móvil, en caso de llamadas entrantes al mismo

2.2.14 Registro

Es el proceso mediante el cual un móvil comunica a la red que está disponible para realizar y recibir llamadas. La red, por su parte, llevará a cabo una serie de intercambios de información con sus bases de datos antes de permitir o "registrar" al móvil. Gracias a este registro, la red sabrá en cada momento dónde localizar dicho móvil en caso de llegarle una llamada entrante.

2.2.15 Roaming o Itinerancia

Es la capacidad que ofrece una red móvil para poder registrarse en cualquier VLR de la red. El usuario tiene que ser capaz de utilizar su unidad móvil a través de diferentes áreas de coberturas y por los diferentes sistemas celulares que ofrecen el servicio. Un usuario que esta en esta situación es conocido como *roamer*.

Actualmente, el concepto de "*roaming*" está comúnmente asociado al registro de un móvil en una red distinta de la propia. En los sistemas modernos, el teléfono móvil recibe una identificación del sistema del operador al encenderse. Si en ese momento, el teléfono móvil detecta que la identificación del sistema no es la de su operador, es porque esta en "*roaming*"; es decir, esta usando los servicios de otro operador; con lo cual se puede usar un teléfono móvil en diferentes países.

Cuando es encendido, el móvil también transmite un pedido de registro, por lo que la red no tendrá problemas para encontrar al móvil.

2.2.16 Topología de la red celular

La topología celular está compuesta por áreas circulares o hexagonales (*Figura 2-10*), cada una de las cuales tiene un nodo individual en el centro.

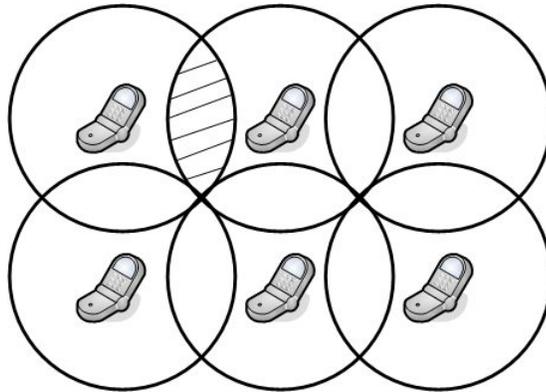


Figura 2-10. Topología de la Red Celular.

La topología celular es un área geográfica dividida en regiones (celdas) para los fines de la tecnología inalámbrica. En esta tecnología no existen enlaces físicos; sólo hay ondas electromagnéticas. La ventaja obvia de una topología celular (inalámbrica) es que no existe ningún medio tangible aparte de la atmósfera terrestre o el del vacío del espacio exterior (y los satélites). Las desventajas son que las señales se encuentran presentes en cualquier lugar de la celda y, de ese modo, pueden sufrir disturbios y violaciones de seguridad.

Como norma, las topologías basadas en celdas se integran con otras topologías, ya sea que usen la atmósfera o los satélites.

2.2.17 Calidad

La calidad del servicio debe ser comparable con el servicio de telefonía convencional. El nivel de calidad lo establece el Grado de Servicio o GOS, también conocido como QoS (*Quality of Service*). El GOS puede ser definido como el número de llamadas perdidas o que no se llevaron a cabo, de manera relativa al número de llamadas intentadas.

En la práctica, el GOS es expresado como la porción de llamadas que no pudieron llevarse a cabo durante la hora pico de servicio debido a la falta de canales. El GOS debe ser típicamente de .02 (2%) y si es posible mejor. Esto significa que como máximo 2 llamadas en promedio (de cada 100), pueden ser bloqueadas, o considerarse como pérdidas en horas pico de servicio, durante las horas no pico el servicio no debe tener problemas para llevar a cabo todas las llamadas. A parte de la calidad en el servicio, también para los usuarios el costo y los aspectos económicos al contratarlo juegan un papel importante en su decisión, por tanto debe ser accesible al público en general.

2.3 Subsistemas de una red celular

2.3.1 Radio

El subsistema de radio, o la radio, es el que realiza el enlace entre los terminales móviles y las redes terrenas. El diseño de esta red es tremendamente importante en la configuración de una red celular, y gran parte del éxito o fracaso de la calidad de una red pasa por la planificación adecuada de este subsistema

2.3.2 Conmutación

La conmutación o estructura de red es el subsistema encargado de llevar las comunicaciones por tierra desde la estación base a la que se conecta el móvil hasta su conexión con la red destino de la llamada (generalmente la red fija) o hacia otra estación base a la que se encuentra conectado otro móvil. Se incluyen dentro de los sistemas de red todas aquellas bases de datos que apoyan a las distintas funciones del sistema

2.3.3 Transmisión

Es la estructura de enlaces que soporta las comunicaciones entre los diversos elementos de red. Es un elemento importante en la planificación, dado que implica grandes costes de explotación, y al que no se presta la debida importancia por ser poco "llamativo" cuando se explican las funcionalidades y capacidades de una red celular. Este subsistema es común a cualquier red de telecomunicación.

2.3.4 Operación y Mantenimiento

Otro de los subsistemas importantes en una red celular es el subsistema de operación y mantenimiento. Suele quedar fuera de todos los planes de estudio, dado que el funcionamiento teórico de la red no necesita de este subsistema. No obstante, no sería posible mantener en un correcto funcionamiento una red de telecomunicaciones sin un sistema de operación y mantenimiento que permita detectar y corregir o, al menos, ayudar a corregir los posibles fallos que se producen a diario en cualquier red.

2.3.5 Explotación

Al igual que el anterior, el subsistema de explotación no suele aparecer en los libros de texto. Es más, los fabricantes de equipos de red sólo dotan a estos de un interfaz hacia el subsistema de explotación, que debe ser comprado o, en el mejor de los casos, desarrollado a medida para el operador. El subsistema de explotación es el que permitirá al operador cobrar por el uso de su red, así como administrar la base de datos de sus clientes y configurar sus perfiles de usuario en función de las políticas comerciales desarrolladas.

2.4 Resumen

En este capítulo se hace una breve reseña de los antecedentes históricos de la telefonía celular. Se explican los conceptos generales utilizados en el diseño de una red celular y los elementos básicos que la conforman. Finalmente se describen brevemente cada uno de los subsistemas del sistema de radiotelefonía celular.

3 Evolución de los sistemas celulares

Para separar una etapa de la otra, a la telefonía celular se le ha categorizado por generaciones según la evolución que ha ido presentando.

Los sistemas celulares poseen diferencias clave que los distinguen entre sí, tales como: el ancho de banda del radiocanal, el tipo de tecnología del acceso (FDMA, TDMA, y CDMA), las tasas de señalización de los datos del canal de control y los niveles de potencia que son capaces de manejar.

El ancho de banda del radiocanal determina que tanta información y cuántos usuarios puede soportar el sistema. Las tecnologías de acceso determinan como las estaciones móviles (MS's) obtienen el servicio y como comparten el radiocanal. Las tasas de señalización de los datos determinan que tan rápido se pueden enviar los mensajes sobre el canal de control. El nivel de potencia RF de las estaciones móviles (MS's) y el control de dicha potencia determinan que tan lejos la MS puede operar de la estación base (BST).

Sin importar el tamaño y el tipo de radiocanales, todos los sistemas celulares y PCS (*Personal Communication Systems*) operan bajo el esquema de *full dúplex*¹. Esto implica que una estación móvil debe ser capaz de transmitir y recibir simultáneamente de la estación base. El radiocanal que va de la estación móvil a la estación base es llamado *uplink* (enlace de subida) y el canal que va de la estación base al estación móvil es llamado *downlink* (enlace de bajada). Los radiocanales de *uplink* y *downlink* se encuentran generalmente separados por una banda de 45 a 80 MHz.

Otra de las características principales de los sistemas celulares es su capacidad de *handover* (como se vio en el capítulo 2, sección 2.2.10) de una estación base a otra mientras la llamada esta procesándose. El *handover* es un proceso automático que es resultado de un monitoreo del sistema y del envío de mensajes de control entre la estación móvil y el sistema mientras una llamada esta llevándose a cabo. Los mensajes de control son tan pequeños que el cliente normalmente no es capaz de percibir cuando el *handover* ocurre.

La mayoría de los sistemas celulares usan dos tipos de radiocanales: canales de control y canales de voz. Los canales de control portan solamente mensajes y señales digitales lo cual permite a la MS recuperar la información de control del sistema y competir por el acceso al mismo. Los canales de control solo portan información de control tal como el *paging* (alerta) y mensajes de asignación del canal.

Los canales de voz son esencialmente usados para transferir información de voz. Sin embargo, los canales de voz también son capaces de enviar y recibir información digital de control, necesaria para transmitir los cambios de frecuencia y potencia durante una llamada.

3.1 Sistemas celulares de 1ª. Generación

3.1.1 Características principales

La 1G (Primera Generación) de telefonía móvil aparece en 1979. Las características esenciales que definen a los sistemas celulares de primera generación son las siguientes:

¹ Full dúplex es la capacidad de tener comunicación simultanea ente la persona que llama y quien recibe la llamada

- Telefonía analógica y para transmisión exclusiva de voz: Se utilizaban ondas de radio para establecer la comunicación. La voz se transmitía sin ningún tipo de codificación por lo que era muy sencillo interceptar conversaciones.
- Baja Capacidad: Las señales de radio analógicas hacen un aprovechamiento ineficaz de los recursos del espectro de radio ya que cada portadora de radio viene asociada a un único usuario (SCPC= *Single Channel Per Carrier*) empleando un radiocanal para cada conversación y limitando el reuso de las frecuencias de radio (es decir causa imposibilidad de crear celdas con pequeños diámetros). Por lo anterior, los sistemas no permite ofrecer un número elevado de abonados en el interior de un área limitada.
- Falta de estandarización internacional: Las interfaces son propietarias, no hay compatibilidad entre los diferentes estándares desarrollados durante esta generación.
- El *roaming* está limitado debido a la inseguridad de los sistemas analógicos, a los accesos no autorizados por los países que adoptan el mismo estándar y a causa de la incompatibilidad técnica para los países que adoptan estándares diversos. Es decir su cobertura es limitada y solo regional (en grandes ciudades y carreteras principales).
- La seguridad en el acceso a los sistemas y a las conversaciones es baja ya que el sistema no tiene mecanismos con autenticación de las terminales móviles. Por tanto se produjo la clonación de la programación de los códigos de los aparatos telefónicos, lo que implicaba facilidad para usar de forma no autorizada y abusiva las líneas telefónicas celulares de terceros. Además las conversaciones se podían monitorear y seguir por cualquier persona que poseía un aparato celular por sencillo que éste fuera.
- Calidad: Debido al número limitado de frecuencias disponibles y la falta de algoritmos de codificación aptos para proteger la señal de molestias y de interferencias co-canal, frecuentemente la calidad fónica era apenas suficiente. La falta de nitidez en la transmisión a causa de la interferencia era notable.
- Los aparatos telefónicos demandaban gran potencia, requerían pilas grandes y generaban mucho calor.
- Los costos del sistema eran elevados para los operadores

3.1.2 Topología y operación de la red

La operación básica de un sistema celular analógico es la siguiente:

Cuando la estación móvil es encendida, ésta se inicializa a sí misma haciendo una búsqueda de un conjunto predeterminado de canales de control e identifica el canal de mayor potencia. Durante el modo de inicialización, la estación móvil escucha los mensajes enviados por el canal de control para obtener la información de identificación y establecimiento del sistema.

Después de la inicialización, la estación móvil entra en modo de espera y se mantiene así hasta recibir una llamada entrante y verifica si el usuario ya ha iniciado la llamada. Cuando la llamada comienza a ser recibida o es iniciada, la MS entra en modo de acceso al sistema con lo cual intenta acceder vía un canal de control al mismo. Cuando obtiene el acceso al canal de control envía un mensaje inicial de designación del canal de voz y abre dicho canal de voz.

La estación móvil entonces cambia al canal de voz designado y entra en modo de conversación. Como la estación móvil opera sobre un canal de voz, el sistema usa modulación FM similar a la transmisión comercial de radio FM. Para enviar mensajes de control sobre el canal de voz, la información de voz es substituida por un mensaje de *burst* corto o bien los mensajes de control son enviados a lo largo de la señal de audio.

Cuando una estación móvil intenta obtener servicio de un sistema celular se conoce como acceso. Las MS's compiten por el canal de control para obtener el acceso a un sistema celular. El acceso es establecido cuando un comando es recibido por la estación móvil indicando que el sistema requiere darle el servicio (tal como mensaje de *paging*) o bien como el resultado de una solicitud del usuario para realizar una llamada.

La estación móvil obtiene el acceso mediante el monitoreo del estatus de espera/ocupado del canal de control, dicho monitoreo se realiza antes y durante la transmisión del mensaje de intento de acceso al sistema. Si el canal esta disponible, la estación móvil comienza a transmitir y la estación base monitorea el estatus de ocupación del canal de manera simultanea. Las transmisiones deben comenzar con un tiempo limite preescrito después de que la estación móvil encuentra que el acceso al canal de control está libre o bien que el intento de acceso es detenido, asumiendo que posiblemente otra estación móvil ganó la atención del receptor del canal de control de la estación base. Si el intento de acceso es exitoso, el sistema envía un mensaje de asignación del canal a la estación móvil, para que ésta tome el canal de voz asignado.

Cuando un suscriptor marca un número en la estación móvil para iniciar una llamada, se le conoce como origen. Una llamada origen envía un mensaje de intento de acceso al sistema celular que contiene los dígitos marcados, el sistema identifica la información y si permite el servicio se asigna un canal de voz, enviando un mensaje al móvil al cual se asigno el canal de voz, siempre y cuando este disponible. Si el intento de acceso falla la estación móvil espera una cantidad de tiempo aleatoria antes de intentar el acceso nuevamente.

La estación móvil usa un algoritmo de generación numérica aleatoria interno para determinar el tiempo de espera. El diseño del sistema minimiza la oportunidad de que se presenten colisiones repetidas entre distintas estaciones móviles que estén intentando acceder al canal del control, ya que cada una espera un intervalo de tiempo aleatorio distinto antes de intentar el acceso nuevamente, aún si colisionaron la primera vez en un tiempo simultaneo de intento de acceso.

Para recibir llamadas, el móvil es notificado de una llamada entrante mediante un proceso llamado *paging*. Un *page* es un mensaje del canal de control que contiene el número de identificación móvil (MIN- *Mobile Identification Number*) o número telefónico de la estación móvil deseado. Cuando la estación móvil determina que ha recibido un mensaje de *paging* ésta responde automáticamente con un mensaje de acceso al sistema que indica que su intento de acceso al sistema es el resultado de un mensaje de *paging* y la estación móvil comienza a sonar para alertar al cliente de una llamada telefónica entrante. Cuando el cliente responde la llamada la estación móvil transmite una solicitud de servicio al sistema para responder la llamada. Esto lo hace enviando el número telefónico y un número electrónico serial para proveer al usuario una identidad.

Después de que la estación móvil ha sido cambiada a un radiocanal de voz, ésta envía sobre todo voz u alguna otra información del cliente. Periódicamente los mensajes de control deben ser enviados entre la estación base y la estación móvil. Estos mensajes de control permiten que la estación móvil ajuste su nivel de potencia, cambie sus frecuencias o solicite algún servicio especial (como la triconferencia).

Para conservar la batería, la estación base puede permitir que la estación móvil solo transmita cuando ésta cense que el usuario esta hablando. Cuando haya silencio, la estación móvil puede dejar de transmitir por periodos breves de tiempo (de algunos segundos), cuando el usuario comienza a hablar otra vez el transmisor es encendido nuevamente. Este proceso se conoce como transmisión discontinua.

La *Figura 3-1* muestra un sistema celular analógico básico que posee dos tipos de radiocanales: canales de control y canales de voz. Los canales de control utilizan modulación FSK (*Frequency Shift Keying*) para enviar mensajes de control (datos) entre la estación móvil y la estación base. Los canales de voz típicamente usan modulación FM (*Frequency Modulation*) con breves picos de información digital para permitir los mensajes de control durante la conversación. Las estaciones base tienen típicamente dos antenas, una de transmisión y otra de recepción. Las antenas con receptor dual incrementan la capacidad de recepción de la señal de radio de las estaciones móviles, la cual tiene mucho menor nivel de potencia de transmisión que los transmisores en la estación base. Las estaciones base son conectadas al centro de conmutación móvil (MSC) típicamente mediante una línea telefónica de alta velocidad o bien por un sistema de radio de microondas. Esta interconexión debe permitir que la información de voz así como la de control sea intercambiada entre el sistema de conmutación y la estación base. El MSC es conectado a la red telefónica para permitir que las estaciones móviles sean conectadas a las líneas telefónicas estándar (PSTN).

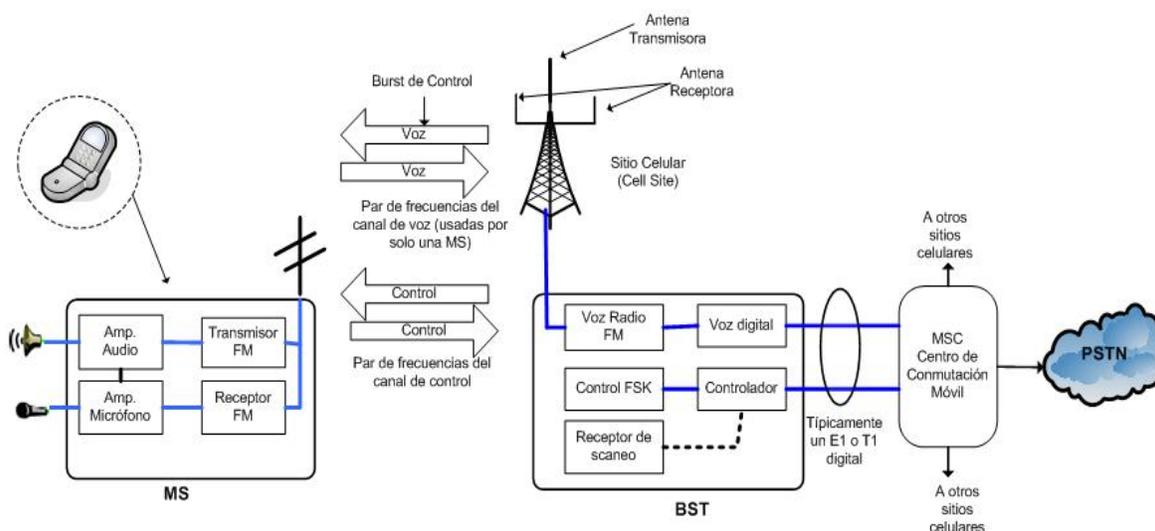


Figura 3-1. Sistema celular típico de 1ª. Generación.

Los sistemas celulares analógicos tienen radiocanales muy estrechos que varían de los 10kHz a los 30 KHz. Éstos sistemas son caracterizados por el uso de modulación analógica (comúnmente FM) para transferir la información de voz. Irónicamente, casi todos los sistemas analógicos usan radiocanales digitales independientes para enviar los mensajes de control.

En los primeros sistemas móviles, la estación móvil exploraba el número límite de canales disponibles hasta que encontraba uno sin utilizar, lo tomaba e iniciaba una llamada. Debido a que los sistemas analógicos hoy en día poseen cientos de radiocanales, la MS no puede buscar entre todos ellos un canal disponible en un tiempo razonable, así que para que el proceso de dirigir la MS hacia un canal disponible sea más rápido, algunos de estos radiocanales son asignados como canales de control dedicados.

Los sistemas analógicos actuales proporcionan el servicio a un solo cliente a la vez por cada radiocanal, así que el número de canales disponibles influye directamente en la capacidad del sistema. Sin embargo un cliente típico utiliza el sistema solamente por unos minutos al día, así que si hacemos un promedio diario puede decirse que varios usuarios comparten el mismo canal. Como regla de 20 a 32 usuarios comparten un radiocanal dependiendo del tiempo promedio de conversación por hora de cada usuario. Generalmente una célula con 50 canales puede soportar de 1000-1600 usuarios.

3.1.3 Técnicas de acceso

La técnica de acceso utilizada en los sistemas de primera generación es: Acceso múltiple por división de frecuencia (**FDMA- Frequency Division Multiple Access**). Ofrece el intercambio de información a través de una tecnología en la cual más de un usuario (múltiple) puede usar (accesar) cada celda de frecuencia disponible.

La tecnología FDMA separa el espectro en distintos canales de voz, al separar el ancho de banda en pedazos (frecuencias) uniformes. Cada estación trabaja con un rango de frecuencias, que delimita el número máximo de llamadas simultáneas que puede soportar, puesto que a cada llamada se le asigna un par de frecuencias diferente: una para cada sentido de la comunicación. Esto se denomina FDM, o multiplexación por división en la frecuencia.

Las celdas colindantes no pueden utilizar las mismas frecuencias, para que no se produzcan interferencias. Pero las celdas que están algo más alejadas si pueden reutilizar estas frecuencias. Y esto es lo que generalmente se hace, en parte de una determinada cantidad de frecuencias disponibles; luego, teniendo en cuenta la densidad estimada de llamadas por área, se determina tanto el tamaño de la celda, así como las frecuencias por celda y la reutilización de frecuencias.

La tecnología FDMA es generalmente utilizada para la transmisión analógica. Esta tecnología no es recomendada para transmisiones digitales, aun cuando es capaz de llevar información digital.

3.1.4 Servicios y funcionalidad

La aplicación más conocida dentro de las comunicaciones inalámbricas celulares es la comunicación de voz. Las tasas del servicio para aplicaciones de voz involucran una carga de conexión inicial, una cuota mensual mínima que incluye unos minutos de tiempo aire mas un cargo por el tiempo aire utilizado adicionalmente. Cuando los clientes usan el servicio en otro sistema diferente al propio (*roaming*) pagarán adicionalmente una cuota diaria o por minuto según sea el caso.

El servicios básico que se ofreció en los sistemas celulares de primera generación fue el de voz incluyendo las siguientes vertientes:

- Conferencia tripartita
- Transferencia de llamadas
- Marcada rápido
- Buzón de voz
- Llamada en espera

3.1.5 Sistemas principales de 1G.

En el desarrollo de esta generación de telefonía celular existieron diversos sistemas analógicos, aunque la tecnología o sistema predominante de esta generación es AMPS (Advanced Mobile Phone System). A continuación se indican los principales sistemas de 1G.

3.1.5.1 Advanced Mobile Phone Service (AMPS).

Conocido como Sistema de Telefonía Móvil Avanzado fue el primer sistema celular analógico que fue lanzado en los Estados Unidos y llegó a ser utilizado en alrededor de 72 países en el año de 1997. Inicialmente a este sistema se le asignaron 40 MHz del espectro de frecuencias disponibles para proporcionar el servicio celular, con este ancho de banda se podían ofrecer cerca de 666 canales. Posteriormente se añadieron 10 Mhz más de espectro de frecuencias que permitieron expandir el sistema a 832 canales.

Las bandas de frecuencia usadas para este sistema son: 824-849 MHz para *uplink* y 869-894 Mhz para *downlink*. Hay dos tipos de radiocanales en AMPS, canales de control y canales de voz. Las estaciones móviles escanean y toman uno de los 21 canales dedicados a control para escuchar la señal de *paging* y competir por el acceso al sistema. El canal de control continuamente envía información de identificación y control de acceso al sistema. Aunque la tasa de envío de datos del canal de control es de 10 kbps, los mensajes son repetidos 5 veces lo que reduce la tasa efectiva del canal por debajo de los 2 kbps. Esto permite a un canal de control enviar de 10 a 20 páginas por segundo. El sistema AMPS es *dúplex* con una separación entre canales de 45 MHz. La tasa de señalización es de 10 kbps.

AMPS, operaba inicialmente como un sistema análogo en la banda de los 800 MHz. Sin embargo ha sido expandido a operaciones digitales TDMA (IS-54/IS-136) y CDMA (IS-95) y mas recientemente a la banda PCS de 1800 MHz a 2000 MHz.

AMPS está definido no solo por un estándar, sino por muchos estándares. Todos los estándares son desarrollados por el comité TR-45 de la TIA (*Telecommunications Industry Association*). Las interfases de radio son definidas por varias familias de estándares, una para cada tecnología (Análoga, NAMPS, TDMA y CDMA). Así, entre de los estándares de 1G pertenecientes a los sistemas AMPS se encuentran según su evolución:

- IS-3: Estándar celular analógico original
- IS-88 Celular Análogo de Banda.
- IS-91 Celular Análogo y PCS.
- IS-94 Celular dentro de edificaciones
- EIA/TIA-553 Celular Análogo

Los sistemas AMPS mas conocidos se encuentran en EEUU y Canadá, algunos países de América Latina, y también en África y en la antigua URSS, exceptuando Europa y la Antártica.

3.1.5.2 Total Access Communication System (TACS)

Conocido como Sistema de Comunicaciones de Acceso Total. El sistema TACS fue introducido en el Reino Unido en 1985 y fue utilizado en cerca de 25 países. Posteriormente se expandió el sistema a través de la suma de un mayor número de canales en lo que resulto como ETACS (*Extended TACS*), TACS extendido.

Los radiocanales del sistema TACS solo poseían 25 KHz de ancho de banda en comparación con los 30 kHz utilizados durante AMPS. Dicho ancho de banda contribuyó con la reducción de la velocidad de transmisión de los canales de señalización.

Los rangos de frecuencia utilizados son 890-915 MHz para *uplink* y 935-960 MHz para *downlink*. Inicialmente se otorgaron 25 MHz de espectro a los sistemas TACS, 10 de los cuales fueron reservados para los siguientes sistemas pan-Europeos en el Reino Unido. Adicionalmente se añadieron 16 MHz de ancho de banda en el ETACS (este último es un sistema de frecuencia *dúplex* cuya separación entre canales es de 45 MHz). La señalización de los canales de control y voz se realizaba a una tasa de 8 kbps.

El sistema TACS también fue modificado para su uso en Japón cuya versión fue llamada JTACS. Los cambios significativos en este sistema se refieren a las bandas de frecuencia y al número de canales utilizados. Otra variante es el NTACS (Narrowband TACS) que reduce el ancho de banda del radio canal de 25 KHz a 12.5 KHz y el cambio en la velocidad de transferencia de la señalización del canal de voz de 8 Kbps a 100 bps en una sub-banda de señalización digital.

3.1.5.3 Nordic Mobile Telephone (NMT)

Existen dos tipos de Sistemas Telefónicos Móviles Nórdicos (NTM): El sistema NMT 450 que es de baja capacidad y NMT 900 que es un sistema de alta capacidad. El sistema NMT fue desarrollado para crear un sistema móvil celular compatible que fuese utilizado en los países nórdicos. El primer sistema comercial NMT 450 fue lanzado en 1981. Debido a su éxito pero a su baja capacidad, se introdujo en 1986 el sistema NMT 900.

El sistema NMT 450 usa una banda de frecuencia baja (450 MHz) y una potencia de transmisión alta lo que permitía cubrir grandes áreas, en cambio el sistema NMT 900 utiliza una banda de frecuencias más alta (900 MHz) y una potencia de transmisión más baja lo cual incrementa la eficiencia y capacidad del sistema. Ambos sistemas pueden coexistir simultáneamente lo que permite usar para ambas tecnologías el mismo MSC.

El sistema NMT es diferente a otros sistemas de telefonía celular en cuestiones de operación. Cuando los móviles acceden al sistema, tienen dos posibilidades o bien encontrar un canal de voz sin utilizar y negociar el acceso directamente o bien comenzar una conversación sin la asistencia de un canal de control dedicado. Debido a que la búsqueda de canales de voz puede consumir tiempo excesivo, el sistema NMT 900 permite el uso de un canal de control dedicado llamado el *calling channel* (canal de llamada). El sistema NMT 900 también introduce una recepción discontinua, que incrementa el tiempo de *standby*.

El sistema NMT 450 es dúplex con 180 canales. El ancho de banda del radiocanal es de 25 KHz y el espacio entre canales de frecuencia dúplex es de 10 MHz. El sistema NMT 900 tiene 999 canales.

La señalización en los sistemas NMT se lleva a cabo con una tasa de 1200 bps sobre el canal de control y el canal de voz. Debido a la baja tasa de señalización y a la robusta capacidad en la detección y corrección de errores, no era necesario repetir los mensajes.

Las estaciones base en el NMT 450 podían transmitir con una potencia de hasta 50 Watts. Esta alta potencia combinada con la baja frecuencia de 450 MHz permiten que el radio del conjunto celular crezca hasta 40 km. En cambio en NMT 900, las estaciones base están limitadas a un máximo de potencia de 25 Watts que permite un máximo radio celular de 20 km.

El sistema NMT es el único sistema de esta generación que incluye varios tipos de protección antifraude. Las estaciones móviles NMT tenían una contraseña de 3 dígitos que eran almacenados en la MS y en el Centro de Conmutación Móvil (MSC) y era desconocido para el cliente. Esta contraseña era enviada al acceder al sistema cuando se realizaba una llamada junto con el número celular de la estación móvil. El sistema NMT añadió también el sistema SIS (*Subscriber Identity Security*) que provee protección adicional antifraude, sin embargo no todas las MS's NMT poseían dicha capacidad SIS.

3.1.5.4 Narrowband AMPS (NAMPS)

Es un sistema celular analógico que fue introducido comercialmente por Motorola a fines de 1991. Al igual que la tecnología AMPS, NAMPS utilizaba modulación analógica FM para transmisiones de voz. La característica distintiva de NAMPS es su uso de un ancho de banda "estrecho" de 10 kHz para los radiocanales, un tercio del tamaño de los canales AMPS.

Debido a que esos canales más estrechos pueden ser instalados en *cada cell site*², los sistemas NAMPS pueden servir a más suscriptores que los sistemas AMPS sin añadir nuevos sitios celulares. NAMPS también cambia algunos comandos de controla el rango de frecuencias subaudible para facilitar transmisiones simultáneas de voz y de datos.

El primer estándar NAMPS, conocido como IS-88, es una evolución de la especificación americana AMPS (EIA-553). El estándar IS-88 identifica los parámetros necesarios para comenzar el diseño de los sistemas NAMPS, tales como el ancho de banda del radiocanal, el tipo de modulación y el formato del mensaje. Durante su desarrollo, la especificación NAMPS se benefició de la banda angosta del sistema JTACS. Durante los siguientes años, características avanzadas tales como la autenticación, el *caller ID* y los mensajes cortos fueron añadidos a la especificación NAMPS.

3.1.5.5 Japanese Mobile Cellular System (MCS)

Japón lanzó el primer sistema celular mundial comercial en 1979. Gracias a que este sistema alcanzó grandes logros, muchos tipos de sistemas celulares han sido desarrollados en Japón. Entre otros el MCS-L1, MCS-L2, JTACS y NTACS

El MCS-L1 fue el primer sistema celular en Japón y fue desarrollado y operado por NTT. El sistema opera en la banda de los 800 MHz. El ancho de banda del canal es de 25 kHz y la tasa de señalización es a 300 bps. Los canales de control son multicast de las estaciones base en el área local. Ésto limita la capacidad máxima del sistema MCS-L1.

Debido a que el sistema MCS-L1 puede solo servir a un número limitado de clientes, surge el sistema MCS-L2, éste utiliza las mismas bandas de frecuencia que el sistema MCS-L1, pero el ancho de banda del radiocanal fue reducido de 25 kHz a 12.5 kHz con un espaciado entre canales (*interleaving*) de 6.25 kHz. Esto le da al sistema 2400 canales disponibles. Los canales de control transfieren información a 2400 bps y los canales de voz pueden usar ya sea señalización en banda (*blank and burst*) a 2400 bps o señalización de sub-banda audio-digital a 150 bps.

Las estaciones móviles MCS-L2 tienen diversidad en la recepción similar a la recepción utilizada en las estaciones base. Aunque esto incrementa el costo y tamaño de la estación móvil también aumenta el desempeño y rango del sistema celular.

² Cell Site: ES la ubicación donde la antena inalámbrica y el equipo de red de comunicaciones es instalado. Consiste de una torre para la antena, transmisor, receptor, controladores de radio y radio transmisores.

3.1.5.6 CNET

CNET es un sistema celular analógico que fue utilizado en Alemania, Portugal y Sudáfrica. El primer sistema CNET inicio operación en 1985. Opera en los 450 MHz con bandas de recepción y transmisión de 4.44 MHz. Las bandas de frecuencia son de 461.3 a 465.74 MHz para *uplink* y 451.3 a 455.74 MHz para *downlink*. El ancho de banda del canal primario es de 20 kHz con *interleaving* de 10 kHz.

El sistema CNET continuamente intercambia información digital entre la estación móvil y la estación base. Cada 12.5 ms, 4 bits de información son enviados en periodos de voz comprimida. Las estaciones móviles también utilizan una tarjeta de identificación (*Identification Card- IC*), la cual se encuentra dentro de la estación móvil para identificar al cliente. Esto permite que los clientes utilicen cualquier teléfono compatible con CNET.

3.1.5.7 MATS-E

El sistema MATS-E es utilizado en Francia y Kuwait. Combina muchas de las características ya identificadas en los diferentes sistemas celulares. MATS-E usa las bandas de frecuencia de 890-915 MHz para *uplink* y 935-960 MHz para *downlink*. El ancho de banda del canal es de 25 kHz lo cual proporciona 1000 canales disponibles. El sistema MATS-E es un sistema de frecuencia *dúplex* separada por 45 MHz. Cada cluster tiene al menos una canal de control dedicado con una tasa de señalización de 2400 bps. Los canales de voz utilizan modulación FM con señalización de sub-banda audio digital con una tasa de datos de 150 bps.

3.2 Sistemas celulares de 2ª. Generación

3.2.1 Características principales: Digitalización y compresión de voz

La 2G(Segunda Generación) arriba en 1990 y principalmente se diferencia de la primera generación por las siguientes características.

- Telefonía digital.
- Utiliza la conmutación de circuitos (*Circuit Switched Data*) con tasas de 9.6 kbps.
- Servicios de voz e introducción de servicios de datos básicos.
- Existencia de estandarización internacional. Se garantiza la compatibilidad entre los sistemas de países distintos permitiendo a los abonados usar sus propias terminales en aquellos países que hayan adoptado el mismo estándar digital y que hayan estipulado un acuerdo con su proveedor de servicios.
- Ampliación de cobertura regional a través del *roaming* transnacional. El *roaming* no está limitado a las áreas cubiertas por un cierto sistema; las llamadas pueden ser tasadas y tratadas usando el mismo número personal también cuando un abonado se traslada de un país a otro. Este uso es limitado solo a los países con es mismo estándar digital.
- La calidad aumenta considerablemente gracias a la mejora en el control de los recursos de radio (potencia variable, ya sea en el MS o en el BTS), también gracias a la codificación, el *interleaving* y el *frequency doping*, las estaciones móviles están en grado de ofrecer una mejor calidad, aún en condiciones de propagación variable.

- Mayor capacidad: Con la técnica de acceso TDMA el usuario utiliza todo el ancho de banda del canal de frecuencia asignado para él, lo que permite incrementar la oferta del servicio a un número mayor de clientes. Las señales digitales desarrollan mejor el espectro de radio, permitiendo el tener celdas también con pequeños diámetros (de cientos de metros). De este modo el sistema puede servir en un área determinada, a un número elevado de abonados.
- Los costos de estos sistemas para los operadores son relativamente bajos. De hecho en un sistema digital el número limitado de radiocanales, permite el uso de un número inferior de receptores de radio para BTS, con el consiguiente ahorro de dinero en términos de espacio, aparatos y tiempo de instalación.
- El sistema 2G utiliza protocolos de codificación más sofisticados que soportan velocidades de información más altas para voz, pero son limitados en comunicaciones de datos. La mayoría de los protocolos de 2G ofrecen diferentes niveles de encriptación.
- Las potentes técnicas de autenticación y código secreto para todos los datos de señalización y conversación permiten un acceso protegido a la red para una parte de los usuarios garantizando un elevado grado de confidencialidad y seguridad en el acceso a los sistemas.
- En los Estados Unidos y otros países se le conoce a 2G como PCS (*Personal Communications Services*).
- Esta generación ha significado el primer acercamiento entre la telefonía móvil e informática.

Los sistemas de 2G en realidad nacen como respuesta a la saturación del espectro reservado para las comunicaciones celulares de 1G, ya que introduce nuevas bandas de frecuencia. En general la tecnología TDMA logra multiplicar por tres el número de usuarios que podían atenderse con la tecnología FDMA y CDMA multiplica por 5 éste número.

3.2.2 Topología y operación de la red

Para poder llevar a cabo la conversión de los sistemas analógicos a los sistemas digitales, algunas tecnologías celulares permiten el uso de móviles de modo dual o multimodo. Estas estaciones móviles son capaces de operar sobre un radiocanal ya sea analógico o digital, dependiendo de cual este disponible, aunque la mayoría de las MS's de modo dual se inclinan por el uso de radiocanales digitales. Esto les permite aprovechar la capacidad adicional y las nuevas características de la telefonía digital tales como los mensajes cortos y la calidad digital en la voz.

Los sistemas digitales de telefonía celular utilizan alguna de las formas de modulación PM (*Phase Modulation*) para transferir información de voz digital y datos. Aunque algunos sistemas analógicos son capaces de proporcionar muchos de los servicios que los sistemas digitales ofrecen, los sistemas digitales además ofrecen flexibilidad en muchas de sus características que pueden ser creadas por cambios en el software. La tendencia por tanto a finales de los 90's, fue la conversión de los sistemas analógicos a sistemas digitales.

Los sistemas digitales son caracterizados por su tecnología de acceso (TDMA o CDMA.) La tecnología de acceso determina como la información digital es transmitida hacia y desde el sistema celular.

Los sistemas celulares digitales pueden generalmente servir a varios suscriptores simultáneamente sobre un mismo radiocanal. Dependiendo del tipo de sistema los sistemas digitales tienen anchos de banda de los 30 kHz a 1.25 MHz y el rango de suscriptores puede variar de 3 a 20 usuarios. Para lograr esto casi todos los sistemas digitales comparten la característica fundamental de digitalizar y comprimir la información de voz. Esto permite que un solo radiocanal sea dividido en varios subcanales o canales de comunicación y cada canal de comunicación pueda brindar el servicio a un solo suscriptor.

Ya que cada usuario generalmente usa el sistema celular por solo unos pocos minutos al día, varios clientes pueden compartir uno de esos canales de comunicación durante el día. Como una regla, de 20 a 32 suscriptores pueden compartir un canal de comunicación; así que si por ejemplo un radiocanal tiene 8 subcanales y un cluster de células contiene 25 radiocanales, este racimo puede soportar de 4000 a 6400 suscriptores.

Los sistemas digitales utilizan dos tipos de canales de comunicación básicamente, canales de control y canales de voz. Un canal de control en un sistema digital es comúnmente uno de los subcanales del radiocanal. Esto permite que el sistema digital combine un canal de control con uno o más canales de voz sobre un mismo radiocanal. La porción del radiocanal que es dedicada como canal de control porta solo señales y mensajes digitales que permiten a la estación móvil recuperar la información de control del sistema y competir por el acceso al mismo. Los otros subcanales del radiocanal portan información de voz y datos.

La operación básica de un sistema celular digital involucra la iniciación del teléfono cuando este es encendido, la espera por los mensajes de *paging* y espera (*idle*), el intento de acceso al sistema cuando es requerido y el modo de conversación (o datos).

En comparación con los sistemas analógicos, los sistemas digitales tienen más canales de control y de comunicación, lo cual puede resultar contraproducente ya que a la MS puede tomarle mayor tiempo realizar la búsqueda entre todos estos canales. Para poder direccional rápidamente una MS hacia un canal de control disponible, los sistemas digitales utilizan varios procesos para ayudar a la MS a encontrar el canal de control disponible. Esto incluye que la MS memorice su última ubicación del canal de control, y con esto ir construyendo una tabla de ubicaciones de canales de control aunado a un mecanismo para apuntar a la ubicación de un canal de control en alguno de los canales operativos.

Una vez que la MS digital ha inicializado, entra en un modo de espera donde da tiempo a recibir alguna llamada entrante o a que el usuario inicie una llamada. Cuando una llamada comienza a ser recibida o iniciada, la MS entra al sistema en modo de acceso para intentar acceder al sistema vía un canal de control. Una vez que obtiene el acceso, el canal de control envía un mensaje de designación de un canal de tráfico digital indicando un canal de comunicaciones abierto. Este canal puede estar sobre un *time slot* diferente en la misma frecuencia o sobre el mismo *time slot* en una frecuencia diferente. El teléfono digital entonces toma el canal de comunicación designado y entra en modo de conversación. Como la MS opera sobre un canal de voz digital, el sistema digital comúnmente utiliza alguna forma de modulación de fase, para enviar y recibir la información.

Las MS's digitales usualmente tienen la habilidad de validar sus identidades de forma más segura durante el acceso que las MS's analógicas. Esto es posible mediante un proceso llamado autenticación. El proceso de autenticación comparte la información de datos secreta entre la estación móvil y el sistema celular. Si la autenticación es exitosa el sistema envía un mensaje de asignación a la MS para que cambie a un nuevo canal de comunicación y la conversación pueda ser iniciada.

Después de que la estación móvil ha sido comandada para tomar un radiocanal de voz, este envía la voz digitalizada o los datos del cliente. Periódicamente son enviados mensajes de control entre la estación base y la estación móvil. Los mensajes de control pueden comandar a la MS para ajustar su nivel de potencia, cambiar las frecuencias o requerir algún servicio especial. Para enviar canales de control mientras la MS digital esta transmitiendo voz digital, la información de voz es remplazada por un pico corto (llamado *blank and burst* o fase de señalización) o también el mensaje de control puede ser enviado a lo largo junto con las señales de voz (llamada señalización baja o *slow signaling* por su nombre en inglés).

La mayoría de las MS's digitales automáticamente conservan la vida de su batería ya que solo transmiten por cortos periodos de tiempo (*bursts*). Además las MS's digitales tienen la capacidad de transmisión discontinua que permite la inhibición del transmisor durante los periodos de silencio del usuario. Cuando un usuario comienza a hablar otra vez el transmisor es encendido nuevamente. La combinación de ahorro de potencia permite a algunas estaciones móviles conservar de 2 a 5 veces la vida de la batería en modo de transmisión.

La tecnología digital incrementa la eficiencia del sistema por la digitalización de la voz, compresión de la conversación (codificación), canal de codificación y el uso de la modulación espectral eficiente de la señal de radio. El estándar de digitalización de la voz en la PSTN produce una tasa de datos de 64 kbps. Debido a que transmitir una señal digital vía radio requiere 1 Hz de ancho de banda por cada bps, una señal de voz digital no comprimida podría requerir mas de 64 kHz de ancho de banda.

Sin la compresión, este ancho de banda haría la transmisión digital menos eficiente que la FM usada en los sistemas analógico, que utiliza solamente 25-30 kHz para un solo canal de voz. Por lo tanto, los sistemas digitales comprimen la información de la conversación usando un codificador de voz o un *vocoder*. La codificación de la conversación quita redundancia en la señal digital, procura ignorar los patrones de los datos que no son característicos de la voz humana. El resultado es una señal digital que representa el contenido del espectro de la frecuencia audio de la voz, no una forma de onda.

Un *vocoder* caracteriza la señal de entrada, busca los códigos en una tabla que representa los distintos patrones digitales para escoger el patrón que más se aproxime a la señal de entrada digitalizada. La relación de compresión de la voz digitalizada utilizada es variable. La compresión varia de 8:1 a 64:1 dependiendo de la actividad de la conversación y del sistema.

La digitalización de la voz y codificación de la conversación toman tiempo de proceso. Típicamente, los frames de conversación son digitalizados cada 20 ms y son introducidos al codificador de conversación. El proceso de compresión, la alineación del tiempo con el radiocanal y la descompresión en el extremo receptor retrasan la señal de voz. Este retraso combinado puede añadir de 50–100 ms de retraso. Aunque tal retraso usualmente no es notable en una comunicación *dúplex*, esto puede causar un eco sorprendente cuando el *speaker* es utilizado o de otra forma el tono de la señal es tan alto que los usuarios pueden escucharse a si mismos. Sin embargo un supresor de eco puede ser usado en el MSC para procesar la señal y remover el eco.

Una vez que la información digital de la conversación es comprimida, los bits de información de control son añadidos con bits adicionales para protección de errores que pueden ser introducidos durante la radiotransmisión. La señal digital combinada (voz e información de control digital comprimida) es enviada al modulador de radio donde es convertida a una señal digital de RF. La conversión eficiente a la señal de RF constantemente involucra alguna forma de PSM (*Phase Shift Modulation*).

La Figura 3-2 muestra un sistema celular digital básico. Este diagrama muestra que generalmente existe solo un tipo de radiocanal digital llamado canal de tráfico digital (DTCH-Digital Traffic Channel). El radiocanal digital es subdividido en canales de control y canales de voz digitales. Ambos tipos de canal utilizan el mismo tipo de modulación digital para enviar los datos de control y de voz entre el estación móvil y la estación base.

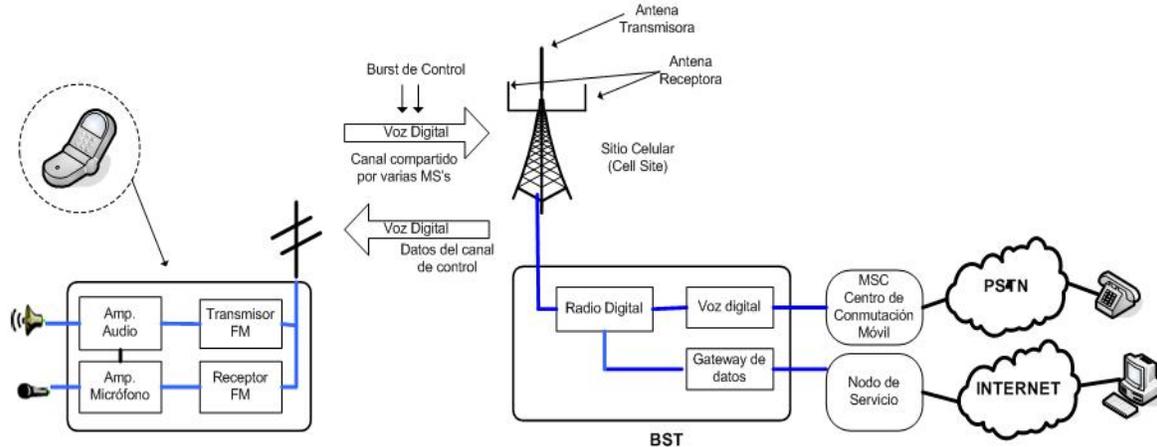


Figura 3-2. Sistema celular típico de 2ª. Generación.

Cuando se utiliza para voz, la señal digital es una señal comprimida que proviene de un codificador de voz. Cuando la conversación esta en curso, algunos de los bits son dedicados para información de control. De forma similar a los sistemas analógicos, las estaciones base de los sistemas digitales tienen dos antenas que incrementan la capacidad de recibir señales débiles de las estaciones móviles. Las estaciones móviles son conectadas al centro de conmutación móvil (MSC) mediante una línea telefónica de alta velocidad o un sistema de microondas. Esta interconexión puede permitir que la información digital comprimida (directamente del codificador de voz) aumente el número de los canales de voz que se pueden compartir en una sola línea de conexión. El MSC es conectado a la red telefónica para permitir a las estaciones móviles conectarse a los teléfonos de telefonía fija.

3.2.3 Técnicas de acceso

Las técnicas de acceso utilizadas por los sistemas de 2G son esencialmente:

- **Acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, por sus siglas en inglés) :**

La **tecnología TDMA** comprime las conversaciones digitales, y las envía cada una utilizando la señal de radio por un tercio de tiempo solamente. La compresión de la señal de voz es posible debido a que la información digital puede ser reducida de tamaño por ser información binaria. Debido a esta compresión, la tecnología TDMA tiene tres veces la capacidad de un sistema analógico que utilice el mismo número de canales.

Cada frecuencia puede transmitir varias conversaciones. Esto se consigue mediante la multiplexación por división en el tiempo (TDM). El tiempo de transmisión se divide en pequeños intervalos de tiempo que pueden ser utilizado por una conversación distinta. Además, una misma conversación se lleva a cabo en intervalos de distintas frecuencias, con lo que no se puede asociar una llamada a una frecuencia.

De este modo, si una frecuencia se ve afectada por una interferencia, una conversación que utilice esta frecuencia, sólo observará problemas en los intervalos pertenecientes a dicha frecuencia.

- **Acceso múltiple por división de código (CDMA, por sus siglas en inglés)**

La **tecnología CDMA** es muy diferente a la tecnología TDMA. La CDMA, después de digitalizar la información, la transmite a través de todo el ancho de banda disponible. Varias llamadas son sobrepuestas en el canal, y cada una tiene un código de secuencia único. Usando al tecnología CDMA, es posible comprimir entre 8 y 10 llamadas digitales para que estas ocupen el mismo espacio que ocuparía una llamada en el sistema analógico. En los sistemas CDMA, lo que se hace es que cada llamada utiliza un código que le diferencia de las demás. Esto permite aumentar el número de llamadas simultáneas o la velocidad de transmisión, lo que se hace necesario ante los crecientes requerimientos de la telefonía móvil.

En teoría, las tecnologías TDMA y CDMA deben de ser transparentes entre sí (no deben interferirse o degradar la calidad), sin embargo en la práctica se presentan algunos problemas menores, como diferencias en el volumen y calidad, entre ambas tecnologías.

3.2.4 Servicios y funcionalidad

- Servicios de voz.
- Llamada en espera y aviso de segunda llamada.
- Redirección de llamadas hacia otro número.
- Identificador de llamadas.
- También ofrece servicios auxiliares tales como datos y fax .
- Servicio de Mensajes Cortos (SMS-*Short Message Service*): Sin duda el servicio de mayor expansión y uso es el servicio de mensajes cortos. Este servicio provee una capacidad buscaperonas direccional basado en los principios de guardar y enviar (*store and forward*). Una estación móvil puede enviar un mensaje de texto de hasta 160 caracteres a otra estación móvil. Si la otra estación móvil no está encendida, el mensaje se guarda en un centro de mensajes cortos (SMSC-*Short Message Service Center*) y luego se transmite más tarde. Este servicio de datos se usa para proporcionar servicios de notificación.

3.2.5 Sistemas principales de 2G.

Las tecnologías predominantes de esta generación son: GSM (Global System for Mobile Communications, utilizado en Europa) conocido en Estados Unidos como PCS/PCN, TDMA (Time Division Multiplexing Access, IS-136/IS-54) conocido también como TIA/EIA-136 o ANSI-13, CDMA (Code Division Multiple Access, IS-95) y PDC (Personal Digital Communications), éste último utilizado en Japón. A continuación se presenta una breve reseña de cada una de éstas tecnologías.

3.2.5.1 GSM (*Global System for Mobile Communication*)

El sistema global para comunicaciones móviles es un sistema digital que utiliza la tecnología de acceso TDMA. GSM es una tecnología celular digital que fue inicialmente creada para proveer un solo estándar celular panEuropeo. Comienza su desarrollo en 1982 y fue el primer sistema digital celular que fue activado en 1991.

La tecnología GSM ha evolucionado para ser utilizada en una gran variedad de sistemas y frecuencias (400 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz y 1900 MHz) incluyendo los sistemas de Servicios de Comunicación Personal (*PCS-Personal Communications Services*) en Norte América y la Red de Comunicación Personal (*PCN-Personal Communications Network*) a través del mundo.

Cuando se está comunicándose en un sistema GSM, los usuarios pueden operar sobre el mismo radiocanal simultáneamente compartiendo los *time slots*. El sistema permite que 8 estaciones móviles compartan el ancho de banda de una onda portadora para voz y datos de 200 kHz. Para operar en modo *dúplex*, la voz es conducida sobre dos ondas portadoras de banda ancha de 200 kHz.

El sistema tiene muchos tipos de canales de control que portan información del sistema y *paging* y coordinan el acceso tal como lo hacen los canales de control en los sistemas analógicos. Los canales de control GSM tienen muchas más capacidades de los canales de control analógicos tales como mensajes *broadcast de paging*, modo extendido de espera y otros. Debido a que los canales de control usan solo una porción (uno o más *slots*) del ancho de banda, éstos típicamente co-existen sobre un mismo radiocanal con otros *time-slots* que son usados para enviar información de voz.

Una portadora GSM transmite a una tasa de 270 kbps, pero un solo radiocanal digital GSM o *time slot* es capaz de transferir solo 1/8 del total, cerca de 33 kbps de información. La tasa máxima de transmisión de voz y datos es de 9.6 kbps. Los intervalos de tiempo son divididos dentro de *frames* con 8 *time slots* sobre dos diferentes radiofrecuencias. Una es para transmitir del teléfono móvil y otra para recibir a la estación móvil. Durante una conversación de voz, un *time slot* es dedicado para transmisión, otro para recepción y los seis restantes permanecen en espera. La MS usa algunos de los *time slots* en espera para medir la fuerza de la señal para prepararse para el *handover*.

En la banda de los 900 MHz, los canales digitales GSM se transmiten sobre una frecuencia y reciben sobre otra, 45 MHz más alta, pero no al mismo tiempo. En la banda de los 1900 MHz, la diferencia entre las frecuencias de transmisión y recepción es de 80 MHz.

3.2.5.2 IS-136 TDMA (TDMA Norteamericano)

El sistema TDMA (IS-136) es un sistema digital que utiliza la tecnología de acceso TDMA, también es conocido como DAMPS (*Digital AMPS*) o NADC (*North American Digital Cellular*). Como característica primaria de estos sistemas podemos mencionar su capacidad de adaptación al sistema AMPS existente. Esta adaptabilidad es debido al hecho de que los canales IS-136 conservan el mismo ancho de banda de 30 kHz de los canales AMPS. Así que la mayoría de las estaciones base pueden entonces remplazar las unidades de radio TDMA en ubicaciones previamente ocupadas por unidades de radio AMPS. Otro factor a favor de la adaptabilidad es que se desarrollaron estaciones móviles de modo dual que operan en ambos canales, los de tráfico digital IS-136 (voz y datos) y los existentes radiocanales AMPS. Esto permite que una MS pueda operar sobre cualquier ambos sistemas si están disponibles.

Adicionalmente IS-136 define un canal de control digital para acompañar al canal de tráfico digital. El canal de control digital permite a una estación móvil operar en un modo solamente digital. IS-136 soporta operaciones en el rango de los 800 MHz para los sistemas existentes AMPS y DAMPS así como la banda de los 1900 MHz para los sistemas PCS. Esto permite una banda dual y por tanto teléfonos de modo dual (800 y 1900 MHz para AMPS y DAMPS). La diferencia primaria entre las dos bandas es que el estación móvil puede no transmitir usando señales analógicas en los 1900 Mhz.

El sistema celular IS-136 permite a las estaciones móviles usar ambos radiocanales analógico de 30 kHz (AMPS) o digital de 30 kHz (TDMA). Los canales TDMA IS-136 permiten que múltiples estaciones móviles compartan el mismo radiocanal de frecuencia por multiplexación de tiempo. Todos los radiocanales están divididos en frames de 6 *time slots*. Los *time slots* usados para los canales *de forward* y *reverse* están relacionados en el tiempo así que una estación móvil no puede simultáneamente transmitir y recibir.

Un *time slot* estándar en un canal TDMA es utilizado como un canal de control digital (DCC). El DCC porta la misma información de sistema y *paging* que portaba un canal de control analógico (ACC). Adicionalmente a los mensajes de control, el DCC tiene más capacidades que el ACC tales como modo de *sleep* extendido, servicio de mensajes cortos, canales de control públicos y privados, entre otros.

La tasa total de bits de la onda de la frecuencia portadora es de 48.6 kbps, en un tiempo compartido. Algunos de esos bits son utilizados para sincronización y otros para propósitos de control; ésto resulta en una tasa de datos disponible para el usuario de 13 kbps. Aunque parte de estos bits, también son usados para detección y corrección de errores, por lo que solo 8 kbps de datos están disponibles para la tasa completa de codificación digital de la voz. Aunque se considera que la tasa máxima de transmisión de voz y datos es de 9.6 kbps.

3.2.5.3 TDMA Extendido (E-TDMA Extended TDMA)

Este estándar fue es una extensión del estándar TDMA IS-136. ETDMA usa el ancho de banda del canal TDMA así como la estructura del canal, sus receptores son tri-modos así que pueden operar en un modo AMPS, TDMA o ETDMA. Mientras un sistema TDMA asigna *time slots* fijos a una estación móvil para cada llamada, ETDMA asigna los *time-slots* de forma dinámica de acuerdo a las necesidades de servicio que se van presentando.

El sistema contiene un codificador de voz de tasa media (4 kbps) lo cual reduce el número de bits de información que pueden ser transmitidos y recibidos cada segundo. Esto permite el uso de periodos de silencio para inhibir el *slot* de transmisión de tal forma que otros usuarios pueden compartir el mismo *slot* de transmisión. El beneficio general es que más usuarios pueden compartir el mismo canal y mejora el desempeño de las radiocomunicaciones. La combinación de una tasa baja en el codificador de voz, la detección de la actividad de voz y la interferencia promedio incrementan la eficiencia del radiocanal para cubrir 10 veces la capacidad del sistema predecesor AMPS.

Algunos de los radiocanales utilizados, incluyen un *slot* de control que coordina la asignación de los *time slots*. La estación móvil celular mantiene comunicación constante con la estación base a través del *time slot* de control. Cuando una conversación inicia, la MS usa el *slot* de control para solicitar un *time slot* de voz de la estación base. A través del *slot* de control, la estación base asigna un *time slot* de voz a la MS para transmitir en ese *time slot* de voz asignado. En cada momento de silencio durante la conversación telefónica, el transmisor de la MS cede su *time slot* de voz, el cual es devuelto al *pool de time slots* disponibles de la estación base y puede ser utilizado por cualquier otro MS que lo solicite.

Cuando una MS está lista para recibir una conversación, la estación base usa el *slot* de control para indicarle que *time slot* de voz tiene la conversación que está siendo enviada. El receptor de la MS entonces cambia hacia el *slot* apropiado. A través del *slot* de control, la estación base constantemente monitorea a la MS para determinar si está liberando un *slot* que ya no se está utilizando o bien necesita un *slot* para continuar con la conversación. En cambio, la MS constantemente monitorea el *slot* de control para verificar que *time slot* contiene conversación de voz que le corresponda y comienza a enviar dicha información de voz.

3.2.5.4 Code Division Multiple Access (IS-95 CDMA)

Este es un sistema celular digital que utiliza la tecnología de acceso CDMA. Fue desarrollada por Qualcomm. El servicio es lanzado comercialmente en Hong Kong y hoy en día múltiples sistemas de este tipo operan alrededor del mundo, incluyendo un sistema a 1.9 GHz completamente digital en los EUA. Conocido también como cdmaOne.

A CDMA se le caracteriza por su alta capacidad y celdas de radio pequeño, que emplea espectro extendido y un esquema de codificación especial y, lo mejor de todo es muy eficiente en potencia. La tecnología de espectro extendido que utiliza ha sido usada por muchos años en aplicaciones militares ya que proporciona alta seguridad y calidad a la información. Diseñado con alrededor de 4.4 trillones de códigos, CDMA virtualmente elimina la clonación de dispositivos y es muy difícil capturar y descifrar una señal.

IS-95 CDMA es un estándar que nos permite realizar comunicaciones de voz o datos o ambas en un radiocanal de 30 kHz similar al AMPS (cuando es usada la banda celular de 800 MHz) o un nuevo canal que fue introducido en este sistema con un ancho de banda de 1.25 MHz. El radiocanal permite que varias estaciones móviles puedan comunicarse sobre la misma frecuencia al mismo tiempo mediante una codificación especial de las señales de radio.

Los radiocanales portan señales de control, voz y datos simultáneamente mediante la división de un canal de tráfico simple (*TCH-Traffic Channel*) en diferentes subcanales. Cada uno de esos canales es identificado por un código único. Cuando opera sobre un radiocanal CDMA, a cada usuario le es asignado un código para la transmisión y recepción de sus señales. Algunos códigos en el TCH transfieren información del canal de control y otros transfieren información del canal de voz.

El canal de control digital que es parte de un canal de tráfico digital porta información del sistema y de *paging* y coordina el acceso en forma similar al canal de control analógico. El DCC tiene más capacidades que el ACC tales como una señal de precisión de sincronización, modo de sleep extendido y otros. Debido a que cada canal tiene muchos códigos, más de un canal de control puede existir sobre un radiocanal y los canales de control coexisten a su vez con otros canales codificados que son utilizados para voz.

Este sistema tiene algunos atributos clave que lo diferencian de otros sistemas celulares. El mismo radiocanal CDMA porta frecuencias que pueden ser opcionalmente utilizadas en sitios celulares adyacentes, con lo que se elimina la necesidad de la planeación de frecuencias, el radiocanal de banda ancha proporciona además menos pérdidas, lo cual resulta en una calidad de voz consistente durante la transmisión bajo condiciones variables de la señal de radio. El sistema CDMA es compatible con las tecnologías de acceso establecidas y permite que los usuarios de modo analógico (EIA-553) y dual (IS-95) utilicen el mismo canal de control analógico. Algunos de los canales de voz son remplazados por transmisiones digitales CDMA, permitiendo que varios usuarios sean multiplexados (compartidos) sobre un solo canal RF.

Los radiocanales CDMA difieren de otros ya que CDMA multiplica cada señal con un único código pseudoaleatorio de ruido (PN- *pseudo-random noise*) que identifica a cada usuario dentro de un radiocanal. CDMA transmite señales de control y voz digitalizada sobre la misma banda de frecuencia. Cada canal contiene las señales de las llamadas entrantes juntas con canales piloto, de sincronización, *paging* y acceso. Las MS's seleccionan la señal que están recibiendo correlacionándola con la señal recibida con la secuencia propia de PN. Esta correlación mejora el nivel de potencia de la señal seleccionada y deja a las otras sin una mejora significativa.

Cada dispositivo que utiliza CDMA está programado con un pseudocódigo, el cual se usa para extender una señal de baja potencia sobre un espectro de frecuencias amplio. La estación base utiliza el mismo código en forma invertida (los ceros son unos y los unos sin ceros) para desextender y reconstruir la señal original. Los otros códigos permanecen extendidos, distinguibles del ruido de fondo.

Cada radiocanal está dividido en 64 canales lógicos separados, codificados mediante un PN. Algunos de esos canales son usados para control y el resto para portar información de voz y datos. Debido a que CDMA transmite información digital combinada con códigos únicos, cada canal lógico puede transferir datos a diferentes velocidades (por ej 4800 bps, 9600 bps)

Un radiocanal CDMA de 64 canales de tráfico puede transmitir a una tasa máxima de *throughput* de 192 kbps, combinado para todos los usuarios. Por tanto, para obtener un máximo de 64 canales de comunicación por cada radiocanal CDMA, la tasa de datos promedio por usuario debe ser aproximadamente de 3 kbps. Si el promedio de la tasa de datos es más alta, solo podrá ser utilizado un número menor de los 64 canales de tráfico. Los sistemas CDMA pueden variar la tasa de datos para cada usuario dependiendo de la actividad de voz (tasa de codificación de voz variable) de tal modo que el decrecimiento en el número de bits promedio por usuario sea de alrededor de 3.8 kbps. Variar la tasa de datos permite que más usuarios compartan el mismo radiocanal pero con una ligera reducción de la calidad de voz. Esto es llamado límite de capacidad suave (*soft capacity limit*).

El canal de 1.25 MHz de CDMA provee un recurso común a las MS en un sistema de acuerdo con sus propias necesidades, como voz, fax, datos u otras aplicaciones. Debido a que CDMA utiliza una porción grande de espectro repartida entre varios usuarios, provee flexibilidad en el ancho de banda para permitir servicios en demanda. Bajo TDMA, donde los canales son fijos y pequeños, esto no es posible.

Toda la información que maneja el sistema se encuentra paquetizada ya que las redes basadas en CDMA están construidas con protocolos basados en IP (*Internet Protocol*). El estándar cdmaOne ya incorpora en sus terminales los protocolos TCP/IP (Protocolo de control de Transmisión/Protocolo de Internet) y PPP (Protocolo punto a punto).

En forma general está comprobado que CDMA es de tres a seis veces más eficiente en ancho de banda y cientos de veces más eficiente en potencia, que TDMA. El sistema CDMA ofrece una amplia cobertura con pocas celdas. Dependiendo de la carga del sistema y de la interferencia, la reducción de celdas es 50 por ciento menor en CDMA que en sistemas como GSM.

Aunado a esto, la confiabilidad y disponibilidad del sistema es lo suficientemente alta; la transferencia de celdas (*handover*) de CDMA reduce inteligentemente el riesgo de interrumpir las llamadas durante una transferencia. El proceso conocido como transferencia suave o transparente (*soft handover*) entre celdas conduce a pocas llamadas caídas, ya que dos o tres celdas siempre monitorean la llamada. La transferencia entre celdas es transparente a los usuarios debido a que como, estos utilizan el mismo espectro, es más fácil moverse de una celda a otra sin que el suscriptor lo advierta.

3.2.5.5 Japanese Personal Digital Cellular (PDC)

El sistema PDC es una tecnología TDMA con una interface de radio que tiene para transmisión de voz 6 *time slots* (usando tasa de datos media: 5.6 kbps), 3 *time slots* (usando tasa de datos completa: 9.6 kbps) y una arquitectura de red principal similar a la de GSM.

PDC soporta al igual que las otras tecnologías de la 2G, características avanzadas tales como SMS e identificador de llamadas. Utilizando sus capacidades de Red Inteligente (IN-*Intelligent Network*), también soporta llamadas prepagadas, números personales, números de acceso universal, esquemas avanzados para realizar cargos y redes privadas virtuales inalámbricas (VPN's)

Para propósitos de transmisión de datos, introduce PDC-P (*PDC Mobile Packet Data Communication System*). Éste utiliza un sistema basado en paquetes que permite a los usuarios utilizar el mismo canal en forma simultánea y es disponible para aplicaciones que utilizan *burst* de datos tales como Internet donde los sistemas basados en circuitos conmutados gastan un mayor ancho de banda ya que requieren un canal dedicado permanente para cada usuario. La tasa de transferencia PDC-P es de 28.8Kbps. Opera en las regiones del espectro de radio de 900 y 1400 MHz y tiene alrededor de 60 millones de suscriptores.

3.3 Sistemas celulares de 2.5 G:

3.3.1 Características principales: Conmutación y transmisión de paquetes.

Los sistemas que se ubican dentro de la generación 2.5G hacen su aparición en 1998 y se caracterizan por:

- Ofrecer características extendidas para ofrecer capacidades adicionales que los sistemas 2G.
- Utilizar conmutación y paquetización de voz y datos.
- Utilizar protocolos estándar similares a los utilizados en Internet, que facilitan el uso del Internet Móvil como:

a) Bluetooth: Es una tecnología de radio de corto alcance que permite la conexión inalámbrica entre varios dispositivos móviles, personales y de trabajo. Sustituye a las conexiones inalámbricas por infrarrojos, y permite un volumen de datos mucho mayor. El Bluetooth permite una conexión a Internet de forma inalámbrica entre un portátil y una estación móvil y el uso de los manos libres inalámbricos. El radio de cobertura máximo es de 10 m., el suficiente para equipos personales, aunque puede llegar a tener un alcance de 100 m. La velocidad máxima de transmisión de datos se sitúa sobre los 723kbps.

b) WAP (Wireless Access Protocol): Es un protocolo basado en los estándares de Internet que ha sido desarrollado para permitir a teléfonos celulares navegar a través de Internet. Con la tecnología WAP se pretende que desde cualquier teléfono celular WAP se pueda acceder a la información que hay en Internet así como realizar operaciones de comercio electrónico.

- Ser los sistemas de transición entre la 2G y la 3G, ya que es la forma más adecuada para actualizar a 3G en vez de ir directamente, por ser más rápida y económica.
- Las telefónicas europeas y de Estados Unidos comenzaron a moverse a 2.5G en el 2001. Mientras que Japón se fue directo de 2G a 3G también en el 2001. En México nos encontramos actualmente en dicha transición a 2.5 G.

3.3.2 Topología y operación de la red

Las tecnologías celulares basadas en paquetes (llamadas comúnmente - la generación 2,5, o 2.5G) son las tecnologías de la 2G que se han mejorado para prever el uso de servicios de comunicación avanzados.

Los sistemas celulares digitales basados en conmutación y transmisión de paquetes tienen como objetivo primordial el colaborar en la transición de la industria que posee actualmente una capacidad "limitada" de servicios hacia una industria con una capacidad mucho más avanzada. De las tecnologías de telecomunicaciones celulares anteriores, los sistemas 2.5G utilizaron la tecnología de radio digital mejorada para aumentar sus tarifas en la transmisión de datos e introducen el concepto de paquetización de datos para aumentar la eficacia del sistema para los usuarios de éste servicio de transmisión.

La *Figura 3-3* muestra que a la arquitectura original de 2G de los sistemas celulares digitales solo se aumentaron algunos elementos que permiten ofrecer características similares a las que ofrecen los sistemas de 3G.

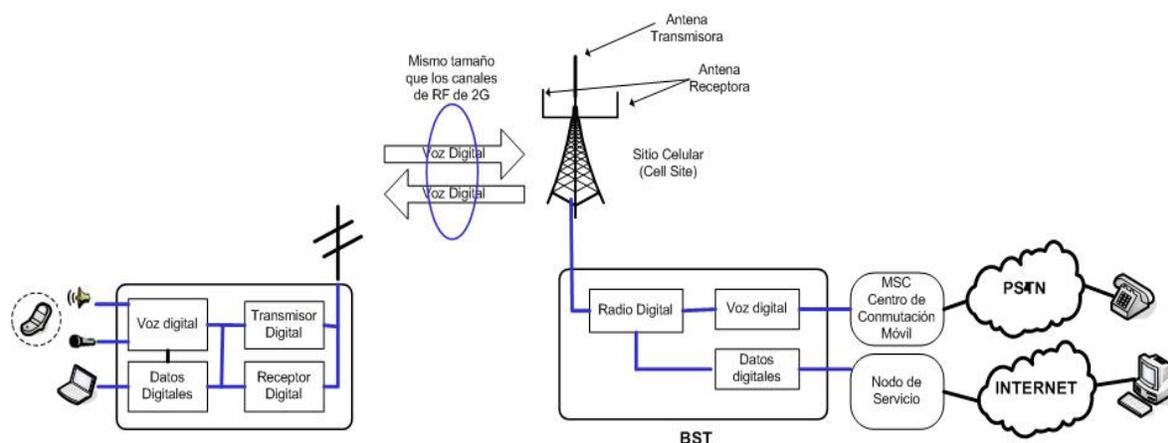


Figura 3-3. Sistema celular típico de 2.5G.

El ancho de banda del canal digital existente de la 2G es reutilizado. En algunos casos, la tecnología de la modulación se cambia dependiendo del sistema específico, para lograr tasas de transferencia de datos más altas. En todos los casos, el canal de tráfico digital se aumenta para permitir la capacidad de interacción con el conmutador de circuitos y de paquetes de datos durante la transmisión. Esto se ve, en más canales del control y canales de voz. Como puede observarse el radiocanal se puede conectar con la red de comunicaciones móviles existente para el servicio de voz o bien puede ser conectado (en ocasiones en forma simultánea) con una red de datos como Internet para ofrecer los servicios de comunicación multimedia.

3.3.3 Técnicas de acceso

Las técnicas de acceso al medio utilizadas en esta generación de sistemas celulares siguen siendo las mismas que las utilizadas en la 2ª. Generación de sistemas celulares. O bien hacen uso de alguna combinación de éstas tal como CDMA/TDMA.

3.3.4 Servicios y funcionalidad

- Servicios de voz
- Servicios de datos de alta velocidad
- Servicios adicionales tales como SMS, mensajes de texto por broadcast, fax, identificador de llamadas, acceso a redes públicas tales como Internet, bloqueo de llamadas, bloqueo de mensajes, llamada en espera, conversación multipartito.
- Tarifación según la cantidad de datos transmitidos.

3.3.5 Sistemas principales de 2.5 G

Las tecnologías pertenecientes a esta generación son: HSCSD (*High Speed Circuit Switched Data*), GPRS (*General Packet Radio System*), EDGE (*Enhanced Data Rates for Global Evolution*) y CDMA2000TM, 1xRTT.

3.3.5.1 HSCSD (*High Speed Circuit Switched Data*)

El HSCSD aparece en 1998, y es una mejora de los servicios de datos basados en la conmutación de circuitos de las ya existentes redes GSM. Este estándar nos permite acceder a los servicios de datos 3 veces más rápido, lo que implica que los suscriptores son capaces de enviar y recibir datos de sus computadoras portátiles a una velocidad de hasta 28.8 kbps e inclusive en algunas redes mejoradas con tasas de hasta 43.2 kbps. Esta solución utiliza canales múltiples, con lo cual las tasas de transmisión son más altas. Es decir que en lugar de utilizar un *time slot*, una estación móvil puede utilizar varios *time slots* para hacer una conexión de datos. En las implementaciones actuales el número máximo de *time slots* utilizados es 4, y como cada *time slot* puede usar ya sea 9.6 kbps o 14.4 kbps, obtenemos velocidades de datos de hasta 57.6 kbps.

HSCSD permite el acceso a la LAN (*Local Area Network*-Red de Área Local) de la empresa, enviar y recibir correos electrónicos y acceder a Internet mientras el usuario se encuentra en movimiento. Esta actualmente disponible para 90 millones de usuarios alrededor de 25 países y con la implementación de los Acuerdos Internacionales para *roaming* entre los operadores HSCSD las funcionalidades que este ofrece son más fáciles de obtener.

HSCSD puede ser usado por usuarios que posean terminales de voz compatibles o bien que utilicen una tarjeta PCMCIA portátil que puede ser utilizada tanto en un teléfono GSM así como en cualquier otro dispositivo portátil, lo que permite alcanzar una funcionalidad de oficina móvil de alta velocidad.

3.3.5.2 GPRS (*General Packet Radio Service*)

Aparece en el año de 1999 y es una porción de la especificación GSM que introduce el servicio de conexiones de datos en modo paquete sobre el sistema GSM. El sistema GPRS añade nuevos canales de paquetes y nodos de conmutación dentro del sistema GSM.

En teoría el sistema GPRS proporciona tasas de transmisión de datos alrededor de los 172 kbps con 8 canales. Otra ventaja del GPRS es que está basado en estándares de redes de datos como Internet (TCP/IP) y X.25. En el apartado 4.2 daremos mayor detalle sobre este sistema.

3.3.5.3 EDGE (*Enhanced Data Rates for Global Evolution*)

Propuesta en 1997 por la ETSI y aceptada por el UWCC (*Universal Wireless Communication Consortium*) para IS-136, es una versión evolucionada del sistema global GSM, también conocido como GSM384, que usa la modulación de fase (PM) y la transmisión de paquetes para proporcionar servicios avanzados y de alta velocidad de datos. El sistema EDGE utiliza modulación 8PSK (8 niveles *Phase Shift Keying*) lo cual permite que un solo símbolo cambie de forma tal que represente 3 bits de información. Esto es 3 veces la cantidad de información que es transferida por una señal modulada mediante 2GMSK (2 niveles de *Gaussian Minimum Shift Keying*) utilizada en la primera generación del sistema GSM. Esto resulta en una velocidad de transmisión de datos del radiocanal de 604.8 kbps y una tasa de transmisión de datos teórica a través de la red de 384 kbps. El sistema de control de transmisión de paquetes avanzado que posee, permite constantemente variar las tasas de transmisión de datos en cualquier dirección entre las estaciones móviles.

3.3.5.4 CDMA2000™, 1xRTT

Este estándar que inclusive se considera de 3G, permite a los operadores evolucionar de sus redes IS-95 para ofrecer los servicios de los sistemas celulares tercera generación. La propuesta original contenía dos fases de evolución distintas: la primera conocida como 1xRTT que usa los mismos canales de 1.25 MHz que usaba IS-95 pero incrementa la capacidad y las tasas de datos hasta 144 kbps comparado con IS-95. La segunda fase fue conocida como 3xRTT que usa 3 veces el espectro de IS-95, es decir canales de 3.75 MHz. El concepto 3xRTT puede entregar tasas de datos aproximadamente de 2 Mbps, un requerimiento para ser considerada una tecnología de 3G. Sin embargo evoluciones recientes de 1xRTT están ofreciendo tasas cercanas a los 2 Mbps por lo cual 3xRTT puede no ser requerido. En cuanto a el crecimiento del sistema, a mediados del 2003 había un total de 60 redes 1xRTT comerciales ofreciendo el servicio.

3.4 Sistemas celulares de 3ª. Generación

3.4.1 Características principales: Redes multiservicio.

La 3G (Tercera Generación) llega en el año 2001 y se caracteriza por:

- La convergencia de la voz y datos con acceso inalámbrico a Internet.
- Acceso y transmisión de alta velocidad : Los protocolos empleados en los sistemas 3G soportan más altas velocidades de información. Se alcanzarán velocidades de hasta 384 Kbps permitiendo una movilidad total a usuarios viajando a 120 kilómetros por hora en ambientes exteriores y alcanzará una velocidad máxima de 2 Mbps permitiendo una movilidad limitada a usuarios caminando a menos de 10 kilómetros por hora en ambientes estacionarios de corto alcance o en interiores.
- Perfeccionamiento de la técnica de acceso CDMA y TDMA.
- Cobertura Global (Mundial). Itinerancia internacional entre diferentes operadores (Roaming Internacional).
- Transmisión de datos simétrica y asimétrica.

- Las MS dispondrán de grandes *displays* (está será la característica más llamativa) con navegadores y mejor resolución. Estos terminales coexistirán con otros muy sencillos orientados a voz para el usuario no interesado por sofisticados servicios o quizá no dispuesto a pagarlos.
 - Servicios de conmutación de paquetes y en modo circuito, tales como tráfico Internet (IP) y video en tiempo real.
 - Calidad de voz comparable con la calidad ofrecida por sistemas alámbricos.
 - Mayor capacidad y mejor eficiencia del espectro con respecto a los sistemas actuales.
 - Capacidad de proveer servicios simultáneos a usuarios finales y terminales.
 - Incorporación de sistemas de segunda generación y posibilidad de coexistencia e interconexión con servicios móviles por satélite.
1. Los sistemas de tercera generación deberán proveer soporte para aplicaciones multimedia como: voz en banda estrecha a servicios multimedia en tiempo real y banda ancha, navegación por la *World Wide Web* (WWW), correo electrónico multimedia, comercio electrónico móvil, videoteléfono, videoconferencia interactiva, audio y música, aplicaciones multimedia especializadas como telemedicina y supervisión remota de seguridad.
- Actualmente existen redes 3G operando en Japón por NTT DoCoMo, y en Korea por SK Telecom y KT.
 - En relación a la cantidad de usuarios que podría albergar 3G, se dice para este año habrá más de 1,150 millones de usuarios en el mundo.

En resumen los sistemas de tercera generación surgen con el objeto de ofrecer nuevos servicios de telecomunicaciones a los usuarios. El sistema no solo se utilizará para transferencia de información entre usuarios sino también entre dispositivos portátiles que funcionarán a nombre de los usuarios. A continuación se presenta un gráfico que muestra la forma en que se han ido introduciendo los distintos servicios de voz y datos desde la 2G hasta lo que se espera en la 3G (Figura 3-4).

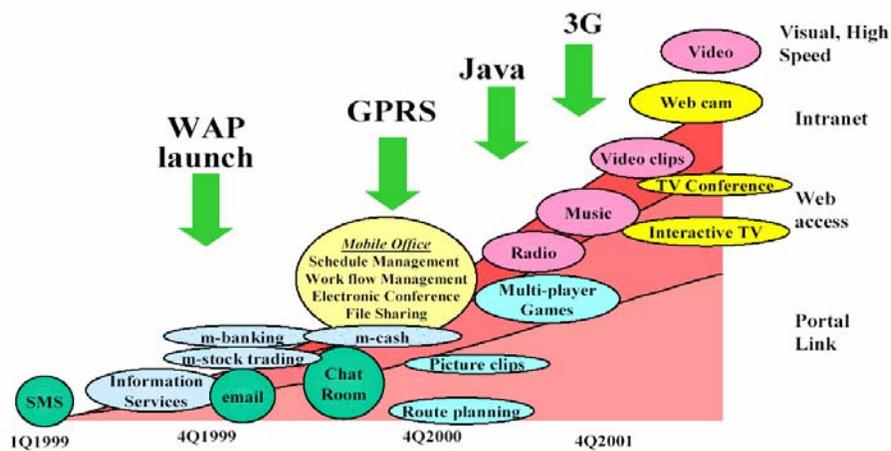


Figura 3-4 Tipo de servicios ofrecidos por las redes desde 2G hasta 3G.

3.4.2 Topología y operación de la red

Los sistemas celulares digitales de 3G son tecnologías celulares que utilizan radiocanales de banda ancha en comparación con los de banda angosta utilizados en la 2G.

En la *Figura 3-5* podemos observar un sistema celular de banda ancha, que permite el uso de tasas de transmisión de datos de alta velocidad mediante la utilización de radiocanales decenas de veces más anchos que los utilizados en la 2G. Este sistema también utiliza servidores de comunicación para ayudar a administrar las sesiones multimedia.

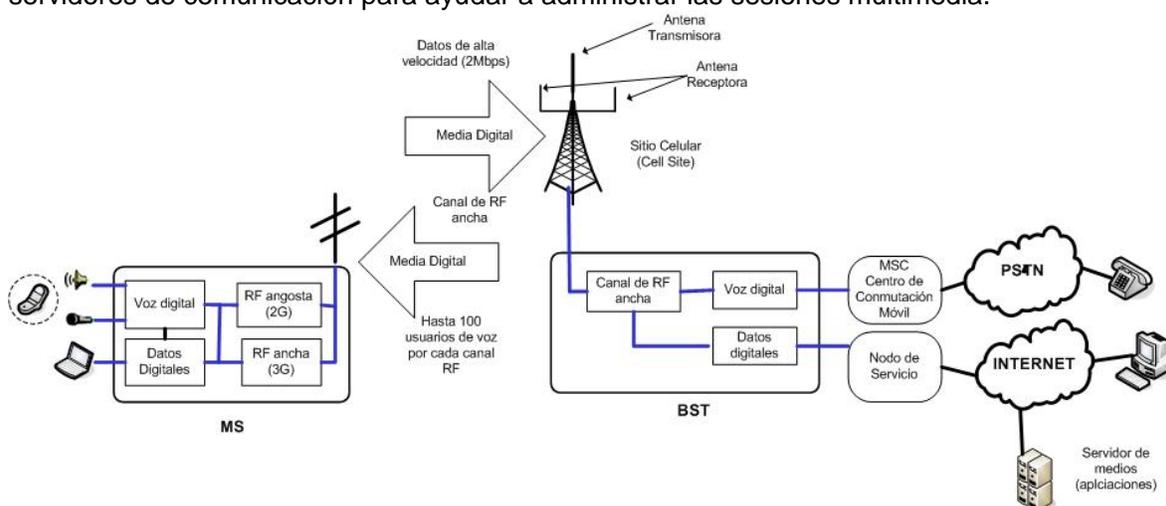


Figura 3-5 Sistemas Celulares de 3ª. Generación.

Además del uso de radiocanales de banda ancha y los servicios de datos mejorados, este diagrama muestra que los sistemas de 3G utilizan típicamente los mismos sistemas de conmutación en su red de voz (tales como el MSC) usados en la 2G.

3.4.3 Técnicas de acceso

Nuevamente se siguen utilizando técnicas de acceso híbridas tales como TDMA/CDMA o FDMA/CDMA o bien DS-CDMA (*Direct Sequence Code Division Multiple Access* basada en FDD-*Frequency Division Duplexing*), MC-CDMA (*Multi-Carrier CDMA*), y TDD-CDMA (*Time Division Duplexing CDMA*).

3.4.4 Servicios y funcionalidad

- Servicios de voz
- Llamada en espera
- Segunda llamada
- Reenvió de llamadas
- Identificador de llamadas
- SMS (Servicio de Mensajes Cortos)
- MMS (Servicio de Mensajes Multimedia): Es un estándar abierto de mensajería que están impulsando compañías como Nokia, Ericsson, Comverse, Motorola y Siemens, entre otras.

Este estándar permite el envío de mensajes cortos a direcciones de correo electrónico, con la integración de imágenes, sonidos y vídeo. Está especificado en el 3GPP (*Third-Generation Partnership Program*), que es el organismo de estandarización para las redes 3G, y en el *WAP Forum*.

3.4.5 Sistemas principales de 3G.

Los requerimientos de la tercera generación inalámbrica son definidos en el proyecto internacional IMT-2000 desarrollado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU). El IMT-2000 define los requerimientos para la transmisión de datos a alta velocidad, los servicios basados en IP (*Internet Protocol*), el *roaming* global y las comunicaciones multimedia. Como parte de este proyecto se han desarrollado básicamente 2 propuestas de sistema global: WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) y CDMA2000. Los objetivos primarios de ITU para IMT-2000 son:

- La eficacia operacional, particularmente para los datos y servicios de multimedia,
- Flexibilidad y transparencia en la provisión de servicio global,
- La tecnología conveniente para reducir la falta de telecomunicaciones, es decir ofrecer un costo accesible para millones de personas en el mundo que todavía no tienen teléfono.
- La incorporación de toda una variedad de sistemas.
- Alto grado de uniformidad de diseño a escala mundial.
- Alto nivel de calidad, comparable con la de una red fija.
- Utilización de una terminal de bolsillo a escala mundial.
- La conexión móvil-móvil y móvil-fijo.
- La prestación de servicios por más de una red en cualquier zona de cobertura.

En Europa, el Instituto Europeo de Telecomunicaciones (ETSI) ha propuesto la norma paneuropea de tercera generación, UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*). UMTS es miembro de la familia global IMT-2000 del sistema de comunicaciones móviles de "tercera generación" de ITU. En Estados Unidos el Instituto Americano de Estándares (ANSI) sigue trabajando en la evolución de sistemas AMPS/IS-136 y CDMA/IS-95. Por otra parte, en Japón la Asociación de Industrias de la Radio y Radiodifusión (ARIB) también está trabajando en CDMA para la elaboración de normas de tercera generación.

Los organismos regionales de normalización ETSI (Europa), TIPI (EUA), ARIB (Japón) y TTA (Corea) trabajaron en propuestas separadas de la norma W-CDMA, estos entes regionales sumaron esfuerzos en el Proyecto de Asociación 3G (3GPP), y hoy en día existe una norma conjunta W-CDMA.

3.4.5.1 Asignación del espectro para IMT-2000

La asignación de espectro para IMT-2000 se realizó en la Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones 1992, WARC 92, asignando 230 MHz en las bandas 1885-2025 MHz y 2110-2200 MHz. Adicionalmente debido a la demanda de servicios y aplicaciones en tiempo real en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones WRC-2000 se proporciona tres bandas extras: 806-960 MHz, 1710-1885 MHz y 2500-2690 MHz.

IMT-2000 comprende también una componente satelital que facilitará los aspectos de *roaming* internacional, así como la obtención de comunicaciones en lugares donde no haya disponibilidad de sistemas terrestres, complementando las celdas Macro, micro y pico.

3.4.5.2 Interfaces de aire IMT-2000

Uno de los elementos más importantes para la definición de las características operativas del IMT-2000, es la selección de la Tecnología de Transmisión y Radio (RTT), también denominada interfaz de aire, parte del sistema que transporta una llamada entre la estación base o móvil y la terminación del usuario. Las distintas interfaces propuestas ante la Unión Internacional de telecomunicaciones están basadas en CDMA que se acompañan de tres modalidades de operación, cada una de las cuales podría perfectamente funcionar sobre la red base de GSM sobre la red base CdmaOne .

Las especificaciones técnicas de las RTT terrestres fueron aprobadas en la WRC-2000 y se definieron como sigue:

- IMT-2000 CDMA *Direct Spread* (UTRA W-CDMA)
- IMT-2000 CDMA *Multi-Carrier* (CDMA-2000)
- IMT-2000 CDMA TDD (UTRA TD-CDMA)
- IMT-2000 TDMA *Single-Carrier* (UWC-136)
- IMT-2000 FDMA/TDMA (DECT).

Una de las ideas generales del IMT-2000 es brindar servicios en cualquier parte del mundo a través del empleo de diversas tecnologías integradas en un solo sistema, ajustándose a diferentes entornos geográficos y densidades de tráfico. Por lo tanto, se ha establecido una estructura de capas de células, clasificándose en cuatro categorías, las cuales pueden funcionar simultáneamente dentro de una misma área geográfica.

- Megacélulas: tienen radios desde 100 hasta 500 Km. Ofrecen amplia cobertura para zonas con baja capacidad de tráfico a través del uso de satélites no geoestacionarios. Soportan velocidades de estaciones móviles elevadas.
- Macrocélulas: tienen radios desde 1 hasta 35 Km. Se emplean para ofrecer coberturas en lugares rurales, carreteras y poblaciones cercanas.
- Microcélulas: tienen radios desde 50 m hasta 1 Km. Ofrecen servicio a usuarios fijos o que se muevan lentamente con elevada densidad de tráfico.
- Picocélulas: tienen radios menores a 50 m. Ofrecen coberturas localizadas en interiores.

3.4.5.3 WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*)

Es un sistema celular digital de 3G que utiliza radiocanales que tienen un plan de canales cuyo ancho de banda es de 5 MHz. WCDMA es la tecnología que se adoptará ampliamente para la interfaz aire de los sistemas de tercera generación. Dentro de 3GPP, WCDMA es llamado UTRA- FDD (*Universal Terrestrial Radio Access -Frequency Division Duplex*) y UTRA - TDD (*Time Division Duplex*), el nombre WCDMA será utilizado para cubrir ambos tipos de operación FDD y TDD.

La banda de frecuencias utilizada es de 2 GHz con algunas pequeñas variaciones en algunos países. La diferencia básica entre FDD y TDD es que FDD usa diferentes bandas de frecuencia para el *downlink* y el *uplink*, mientras que TDD usa la misma banda de frecuencias para ambos enlaces tanto de subida como de bajada. Mientras que el diseño original de los sistemas digitales celulares se optimizó para transportar voz, la 3G requiere una red radio optimizada para un ancho de banda variable constituido por voz y datos. La consecuencia del mayor ancho de banda es una mayor capacidad y calidad. WCDMA proporciona capacidad según la demanda e incrementa de forma notable la eficiencia del espectro.

La mejora en la propagación multitrayecto contribuye a una mejor calidad de conexión y, por tanto, a una mayor capacidad, mayor cobertura y menor potencia de transmisión de la MS. Así mismo, el enlace ascendente incrementa considerablemente su capacidad y ofrece una célula de mayor rango. Se podrán manejar un mayor número de llamadas simultáneas en menos emplazamientos de células, resultando esto en menores costos de operación. El WCDMA se adaptará a todos los entornos, interior y exterior, rural y urbano y soportará antenas que puedan adaptarse a radio de largo alcance para servicios de bits de alta velocidad, sin incrementar los niveles de potencia.

En WCDMA no es necesario sincronizar las BST por un sistema radio externo, operado por un tercero. De esta forma se facilita el montaje de emplazamientos interiores al no necesitar antenas exteriores y se reducen los costos de emplazamiento; además, el operador tiene el control independiente de su propia red. La arquitectura del sistema GSM en sus distintas fases será también la base para la red básica del sistema de 3G WCDMA, de esta forma se minimizarán los costos de su implantación. La mayor parte de los operadores iniciales serán miembros de la comunidad GSM.

La red básica GSM se desarrollará para cubrir todos los requisitos de sistema de 3ª generación. O mas concretamente, se podría ver el nuevo subsistema radio (Radio Access Network RAN) como una nueva red superpuesta al subsistema BSS de GSM. Así se promoverá el uso de estaciones base GSM y UMTS en el mismo emplazamiento e igualmente respecto a las controladoras UMTS y GSM.. Con el centro de conmutación basado en ATM, el interfaz entre el BSS y el NSS se basará en esta tecnología. Un gran número de operadores GSM tienen un espectro seguro para el desarrollo de WCDMA, considerando que el lanzamiento de esta tecnología ya es inminente ya que algunas redes de este tipo ya existen en Japón, Reino Unido e Italia. A continuación se muestra una gráfica evolutiva del estándar GSM (ver Figura 3-6) desde sus inicios en 2G conocido como GSM Fase 1 o simplemente GSM hasta su desarrollo en 3G conocido como 3GSM o UMTS.

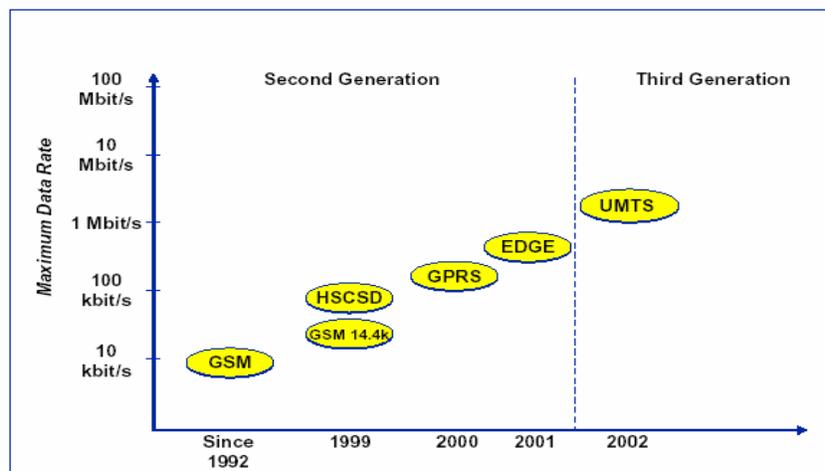


Figura 3-6 Evolución de GSM

3.4.5.4 Code Division Multiple Access 2000 (CDMA2000)

Es una familia de estándares que representa la evolución del sistema CDMA IS-95 y que ofrece protocolos de transmisión de paquetes mejorados que proporcionan servicios avanzados de datos de alta velocidad. La tecnología CDMA2000 opera en los mismos canales de 1.25 MHz utilizados por IS-95 y ofrece compatibilidad con éste sistema.

El sistema CDMA2000 es supervisado por el 3GPP2 (*Third Generation Partnership Project 2*). El 3GPP2 es un estándar que se centra en el desarrollo de especificaciones globales para sistemas de 3G que usan ANSI/TIA/EIA-41 *Cellular Radio Intersystem Signaling*. Dentro de esta familia de estándares encontramos el CDMA2000 1xEVDO y CDMA2000 1xEVDV:

- **Evolution Data Only (1xEVDO)**

La evolución de sistemas existentes solo para datos 1xEVDO es una versión procedente del sistema CDMA2000™ 1xRTT. Usa el mismo ancho de banda del radiocanal al igual que el sistema IS-95 original y proporciona servicios de canales de voz múltiples y una tasa de datos media. La versión 1xEVDO cambia la tecnología de modulación que permite tasas de transmisión de datos de hasta 2.5 Mbps. El sistema 1xEVDO actualiza el sistema de control de transmisión de datos con lo cual se transfieren *bursts* de datos en lugar de llevar a cabo una transmisión continua de voz y datos.

- **Evolution Data and Voice (1xEVDV)**

La evolución de sistemas existentes para voz y datos, 1xEVDV, es una versión también procedente del sistema CDMA2000™ 1xRTT. El sistema 1xEVDV proporciona transmisión de voz y datos a alta velocidad en el mismo canal de ancho de banda existente en el sistema IS-95. La tasa de transmisión máxima utilizada es de 2.7 Mbps.

3.4.5.5 TD-SCDMA (*Time Division Synchronous CDMA*)

A pesar de que WCDMA y CDMA2000 dominaran el mercado de 3G, en China se está desarrollando un estándar conocido como TD-SCDMA el cual ofrece servicios de voz y datos por conmutación de paquetes y circuitos, con tasas de transmisión de 2 Mbps. Este estándar usa la técnica de Duplexación por División de Tiempo (TDD-*Time Division Duplex*) en la cual las señales transmisora y receptora son enviadas en la misma frecuencia pero en distintos instantes de tiempo. Los *time slots* sobre la portadora de radio pueden ser ubicados ya sea simétricamente para servicios de voz o asimétricamente para servicios de datos y las tasas de bits en las dos direcciones de transmisión pueden diferir significativamente.

3.5 Perspectivas y evolución hacia la 4ª. Generación

La cuarta generación es un proyecto donde la velocidad será 50 veces más rápida que la de la 3G. Se planean hacer pruebas de esta tecnología en el 2005 y se espera que se empiecen a comercializar la mayoría de los servicios hasta el 2010. Considerando que en 3G la velocidad máxima será de 2 Mbps, la cual no es suficiente para satisfacer los servicios multimedia en tiempo real (por ej.: transferencia de video) se espera que para la 4G dichos servicios multimedia al menos alcancen una velocidad de 10 Mbps (semejantes a lo que se ofrece en una red LAN básica) e inclusive se piensa en velocidades aún mayores.

Para satisfacer dichas características se requiere contar mínimo con un ancho de banda de 20 MHz por canal, por lo que las tecnologías pertenecientes a esta generación se consideran de banda ancha. Puesto que la potencia necesaria para el transmisor es directamente proporcional al ancho de banda de la señal, el área de cobertura de una estación base para una red de 4G, es de diámetro reducido semejante al de una picocélula. Debido a esto, esta generación no será un sustituto de la 3G sino un complemento. En la *Figura 3-7* se muestra la cobertura que ofrecerá cada tipo de red tomando en cuenta la movilidad y la velocidad de transmisión.

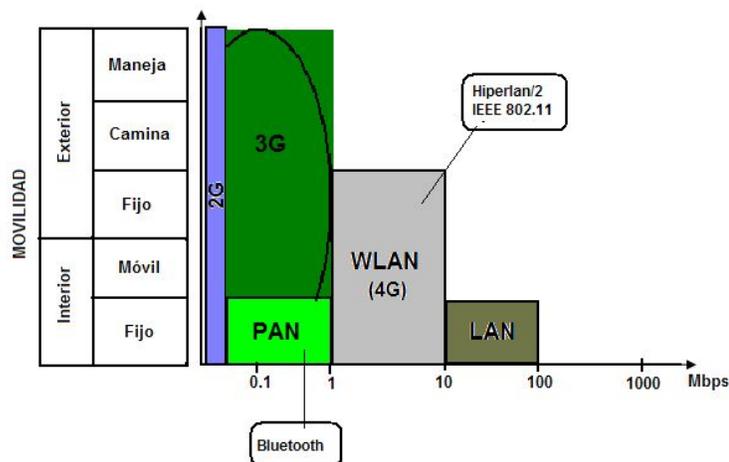


Figura 3-7 Cobertura de los diferentes tipos de redes.

El desarrollo de la 4G y su introducción por parte de los operadores de telefonía celular, dependerá de los siguientes factores:

- El auge de la utilización de Internet a través de medios inalámbricos.
- Proliferación de dispositivos móviles tales como PDA's (*Personal Digital Assistant*) y computadoras personales.
- La disponibilidad de servicios de valor agregado a través del Internet móvil, como por ejemplo las transacciones bursátiles y/o bancarias, reservaciones, compras, etc. integrándose de esta forma el *Comercio Móvil*.
- La oferta de los servicios llamados transparentes donde los dispositivos interactúan entre sí a nombre de los usuarios.

Las tecnologías que pueden ser decisivas en el desarrollo de los sistemas de 4G son:

- ATM (Modo de Transferencia Asíncrono) como red dorsal de la Red Universal Multimedia (RUM) , que permitirá ofrecer diversos servicios con calidad garantizada.
- El protocolo TCP/IP como parte del transporte de la RUM (probablemente no se usen más números de abonado en la red sino direcciones IP).
- La tecnología de antenas adaptativas e inteligentes para aprovechar la dimensión espacial de los métodos de acceso al medio.
- La tecnología de modulación/transmisión inalámbrica de multicanalización en frecuencia con portadoras ortogonales OFDM para lograr una eficiencia espectral óptima.
- La tecnología de radios programables ("Software Radios") la cual permitirá que una estación móvil pueda hacer *handover* desde una célula perteneciente a un tipo de red, hacia otra célula perteneciente a otra red con tecnología inalámbrica diferente.
- La tecnología de redes locales inalámbricas (WLAN's) de banda ancha que brindaran el acceso a la RUM al usuario móvil.

El objetivo de integrar WLAN en las redes públicas es que los usuarios que tengan acceso a una LAN inalámbrica privada puedan reutilizar la misma configuración base (por ejemplo, un PDA o un PC portátil con una tarjeta inalámbrica Wi-Fi) para acceder, tanto en entornos públicos como privados, a sus redes corporativas de datos. Tales accesos serán posibles con el mismo rendimiento, independientemente de cual sea la localización del usuario en cada momento.

Además es una alternativa de acceso en los puntos altamente poblados, denominados "hot spots", donde reside temporalmente una apreciable cantidad de personas con necesidad de establecer, al mismo tiempo, comunicaciones de voz y/o datos y donde la red UMTS no es lo suficientemente eficiente.

Se piensa que el servicio WLAN estará disponible prácticamente en todos los entornos, lo que permitirá proporcionar el servicio de datos mediante paquetes de manera continua entre las dos alternativas de acceso antes mencionadas, con la consiguiente variación de velocidad entre ambas formas de acceso, ya que las velocidades entre las WLAN's sobre todo en el aspecto de transmisión de datos son superiores a las obtenidas con tecnologías celulares de 3G. Se espera además que con esta integración de redes el crecimiento de los usuarios móviles sea aún mayor similar al que se muestra en la *Figura 3-8*:

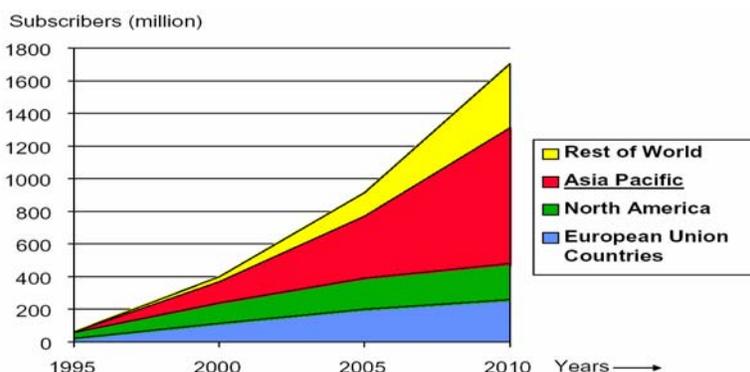


Figura 3-8 Incremento en el número de usuarios móviles.

Esta necesidad de realizar la integración de las redes WLAN y UMTS a través de estándares ha llevado a los distintos organismos mundiales de estandarización involucrados (ETSI, 3GPP, IEEE e IETF) a acelerar los procesos de estudio y especificación del nuevo escenario. En lo que se refiere a la estandarización de estas tecnologías encontramos los desarrollados por ETSI BRAN, principalmente el HIPERLAN2 y por IEEE con su conjunto de especificaciones 802.11x, los cuales definen las especificaciones para las WLAN's

Adicionalmente a las WLAN's en un futuro se piensa integrar éste tipo de redes con las WMAN (*Wireless Metropolitan Area Networks*), cuyos anchos de banda y tasas de transmisión se pretende que sean superiores y permitan interconectar WLAN a grandes distancias, del orden de millas. Sobre este punto también se está trabajando sobre el desarrollo de nuevos estándares, por parte de ETSI BRAN encontramos el estándar HIPERMAN y por parte de IEEE encontramos los estándares 802.16x.

A continuación se enumeran algunas de las principales características de todos estos estándares para redes inalámbricas.

3.5.1 Estándar americano: IEEE 802.11 e IEEE 802.16

3.5.1.1 IEEE 802.11

Es un estándar desarrollado para proporcionar conectividad multimedia inalámbrica a terminales móviles en ambientes de área local llamados WLAN.

- **IEEE 802.11 a:** Este estándar utiliza la banda de los 5 GHz la cual esta a salvo de la interferencia de otras tecnologías y por tanto tiene más ancho de banda disponible lo que le permite trabajar hasta una tasa de 54 Mbps en incrementos de canales de 20 Mhz de ancho de banda. El método de modulación utilizado por este estándar está basado en Multicanalización por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM), también conocido como Modulación Multiportadora; éste método consiste en dividir una señal de información de alta velocidad en múltiples sub-señales de información y transmitir las en paralelo utilizando frecuencias portadoras ortogonales.

El estándar IEE 802.11a define 8 canales en la banda de 5.15 a 5.35 GHz y 4 en la banda de 5.725 a 5.825 GHz. La tasa de 54 Mbps es suficiente para soportar las necesidades presentes y futuras de tráfico a nivel de WLAN, tal como transmisión de ráfagas de DVD y servicios de video por demanda.

- **IEEE 802.11 b (Wi-Fi):** Es la primera versión comercial del estándar 802.11 que utiliza una banda de frecuencia de 2.4 a 2.4835 GHz, conocida como Industrial, Científica y Medica, la cual no requiere ser licenciada. Sus técnicas de transmisión son básicamente de dos tipos: Espectro Esparcido de Secuencia Directa (DSSS) y Espectro Esparcido por Saltos en Frecuencia (FHSS).

Con la primera técnica se pueden lograr tasas de transmisión desde 1 hasta 11 Mbps, mientras que con la segunda se logran tasas de 1 a 2 Mbps. Una desventaja de 802.11b con CDMA es que no permite la transmisión simultanea de varios usuarios utilizando la misma frecuencia por lo que el estándar prevé el uso de 3 canales de frecuencias diferentes, de 22 MHz de ancho de banda cada uno. Por su parte FHSS utiliza 79 canales de banda angosta, de 1MHz de ancho de banda cada uno.

- **IEEE 802.11 g:** Una variante más del estándar 802.11 que trabaja en la banda de los 2.4 GHz y nos permite velocidades de 54 Mbps utilizando la técnica de modulación OFDM.

3.5.1.2 IEEE 802.16 (Wi-Max):

El estándar inicial 802.16 trabaja en el rango de 10 a 66 GHz, lo que da una banda bastante amplia pero implica que es necesario tener línea de vista entre transmisor y receptor, lo que reduce la distorsión multicamino. En teoría el ancho de banda máximo es de 75 Mbps de subida y bajada por cada canal de datos, con múltiples canales se pueden llegar a anchos de banda de 350 Mbps .

WiMAX como también se le conoce provee conectividad de alta velocidad de transmisión de datos en arreas metropolitanas y puede transmitir señales en distancias tan lejanas como 30 millas. Sin embargo en promedio un punto de acceso es capaz de cubrir entre 3 a 5 millas.

Esta tecnología puede ser utilizada para un número de aplicaciones incluyendo conexiones de banda ancha de "última milla" , puntos de acceso (hotspots), celdas y conectividad de alta velocidad para los negocios. En cuanto a seguridad, utiliza autenticación de clave pública y cifra los datos con claves DES de 56 bits.

El grupo de trabajo de IEEE 802.16 ha adoptado algunas extensiones al estándar básico que van desde la 'a' hasta la 'e', variando los rangos de frecuencia y algunas otras características como por ejemplo QoS (Quality of Service- Calidad de Servicio). Por sus características estos estándares se consideran tecnologías de red de área metropolitana inalámbrica (WMAN).

3.5.2 Estándar europeo: ETSI BRAN

ETSI estableció un proyecto de estandarización para redes BRAN (*Broadband Radio Access Networks*) en el año de 1997. Este proyecto preparó una serie de estándares para proveer de acceso inalámbrico de banda ancha (25 Mbps o más) a redes alámbricas tanto en ambientes públicos como privados y operando tanto en un espectro licenciado así como en el no-licenciado. Para asegurar una coherencia completa entre las tecnologías existentes y emergente ETSI BRAN guarda una cercana relación con un número importante de cuerpos técnicos y organismos de estandarización.

Las especificaciones establecen los parámetros para las capas física (PHY) y para la capa de control de enlace de datos (DLC-*Data Link Control Layer*). Las especificaciones interredes, llamadas capas de convergencia (CL-*Convergence Layers*) establecen la manera de interacción entre las redes de banda ancha inalámbricas y las redes alámbricas basándose en las suites de protocolos ATM, TCP/IP y las redes móviles de 3G. ETSI BRAN ha producido especificaciones (estándares) dentro de las 3 principales áreas de estandarización:

3.5.2.1 HiperLAN2

Una red de acceso móvil inalámbrico de banda ancha de corto alcance que proporciona a los consumidores de ambientes públicos o privados (empresas u hogar), acceso inalámbrico a Internet y servicios multimedia, así como servicios de video en tiempo real a velocidades hasta 54 Mbps. El sistema será más rápido y fácil de instalar y proveer compatibilidad entre redes basándose en redes que incluyen Ethernet, IEEE1394 y ATM.

3.5.2.2 HIPERACCESS:

Una red de acceso fijo inalámbrico a redes de banda ancha que permite una alternativa flexible y competitiva a las redes alámbrica. Este será un estándar interoperable que promoverá un mercado masivo y bajos costos. Este estándar trabaja sobre bandas de frecuencia muy altas, especialmente se busca una optimización en la banda de 40.5 a 43.5 GHz.

3.5.2.3 HIPERMAN:

Una red de acceso fijo inalámbrico de banda ancha que opera de los 2 a los 11 GHz. Este estándar ha sido desarrollado en cooperación con el IEE 802.16 de tal forma que ambos sistemas serán capaces de interoperar en el futuro. HIPERMAN es capaz de soportar ATM y ofrece varias categorías de servicios, QoS total, conexión rápida en el manejo del control y gestión de la red, amplia seguridad, rápida adaptación de codificación, modulación y potencia de transmisión y operación aún cuando no se está en línea de vista directa.

3.6 Resumen del capítulo

En este capítulo se hace una descripción a detalle de las diferentes generaciones de tecnología celular que hasta el momento han surgido, así como sus principales características y funcionalidad. También para cada una de estas generaciones se exponen los principales estándares y/o sistemas desarrollados. Finalmente se da una perspectiva de cómo se espera que dichos sistemas evolucionen hacia redes de 4G y 5G.

4 Tecnología GSM

4.1 Global System Mobile (GSM)

La arquitectura de la red GSM está dividida en tres partes: el sistema de conmutación, el sistema de estaciones base y el sistema de operación y mantenimiento (Ver *Figura 4-1*). Cada uno de estos sistemas contiene una serie de unidades en las cuales se realizan diversas funciones que el sistema GSM es capaz de proporcionar.

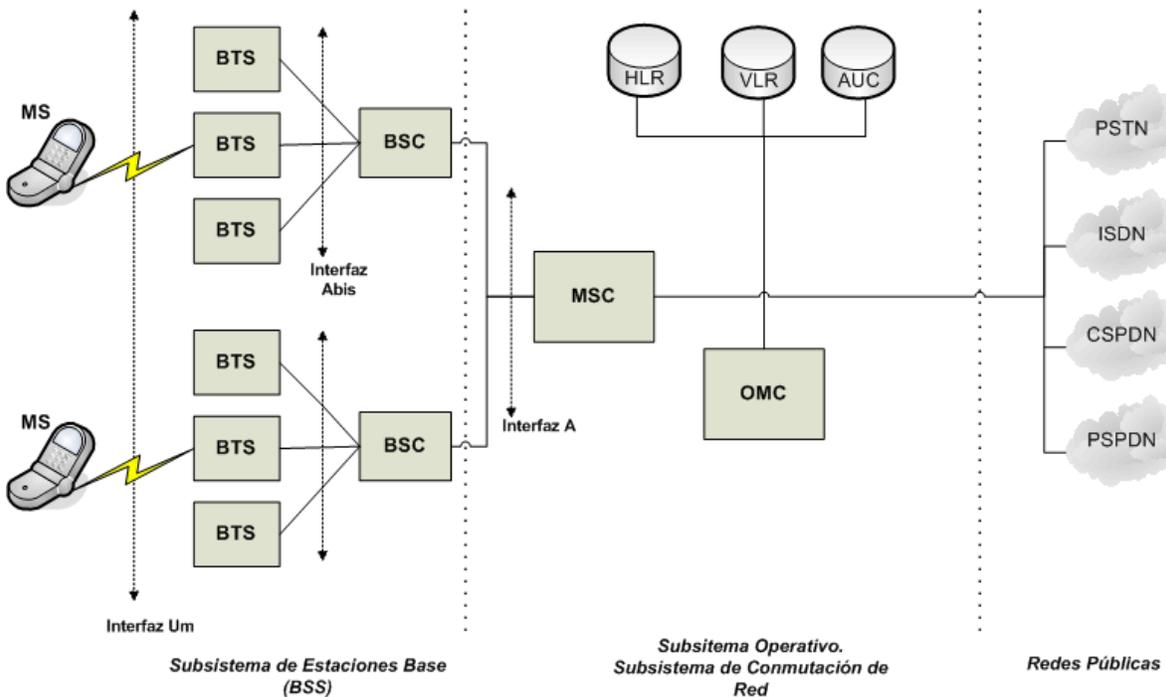


Figura 4-1. Arquitectura de la red GSM.

Las funciones relacionadas con el proceso de llamadas y abonados están implementadas en el sistema de conmutación, mientras que las funciones relacionadas con la radio se concentran en el sistema de estaciones base; todo ello está supervisado por el sistema de operación y mantenimiento.

4.1.1 Nodos de la red GSM

Las funcionalidades de la red GSM se encuentran divididas entre:

- Las estaciones móviles (MS-Mobile Stations): terminales o dispositivos utilizados para que el usuario se comunique en la red celular,

- El subsistema de estaciones base (BSS-*Base Station Subsystem*). El BSS incluye dos tipos de elementos:

La estación base transceptora (BTS-*Base Transceiver Station*) que maneja las interfaces de radio hacia la MS y la estación base controladora (BSC-*Base Station Controller*). Sus funciones son: codificación/decodificación de los canales, cifrado/descifrado del camino radio, medidas de intensidad de la señal, diversidad en la recepción, búsqueda del MS, recepción de las peticiones de canal desde las MSs.

La BSC hace de interfaz entre el BSS y el subsistema de conmutación, puede manejar las comunicaciones de varias BTS's con un solo MSC. Sus funciones son entre otras: administrar los recursos de radio, controlar los *handovers*, supervisión de las estaciones base, gestión de la transmisión hacia las estaciones base, transcodificar y adaptar velocidades y localización de las estaciones móviles.

- El centro de conmutación móvil (MSC-*Mobile Switching Center*), el cual se encarga de establecer y mantener las llamadas que se hacen en la red, gestionar los *handovers* entre centrales, gestionar servicios complementarios y recuperación de datos de verificación y contabilidad. . A través del MSC, el sistema GSM se comunica con otras redes públicas de voz y datos tales como la Red Telefónica Pública Conmutada (PSTN-*Public Switched Telephone Network*), la Red Integrada de Servicios Digitales (ISDN-*Integrated Services Digital Network*), la Red Pública de Datos de Circuitos Conmutados (CSPDN- *Circuit-Switched Public Data Network*) y la Red Pública de Datos de Paquetes Conmutados (PSPDN- *Packet-Switched Public Data Network*).

Adicionalmente la red GSM maneja cuatro bases de datos:

- El Registro de Localización Local (*Home Location Register-HLR*): Es una base de datos donde se almacenan los parámetros de los abonados móviles. La red puede tener uno o más dependiendo de la capacidad de los equipos y la organización de la red. Entre otros se almacenan los siguientes datos: información de la suscripción, información para el enrutamiento de llamadas hacia la central donde el móvil está localizado, identificador internacional de la estación móvil (IMSI- *Internacional Mobile Station Identifier*), número de abonado (MDISDN- *Mobile Station ISDN*), información sobre teleservicios y servicios portadores, restricciones y servicios suplementarios.
- El Registro de Localización Visitante (*Visitor Location Register -VLR*): Este registro es una base de datos donde se almacenan parámetros de todos los abonados que se encuentran dentro del área de servicio del VLR. Cuando un abonado cambia de área de servicio, el nuevo VLR, debe actualizar datos del abonado y pide al HLR todos los datos necesarios para el establecimiento de llamadas hacia/desde el abonado móvil. Este nodo generalmente esta integrado dentro del MSC (MSC/VLR).
- El Centro de Autenticación (*Authentication Center-AUC*). Su misión es generar tripletas de abonado las cuales constan de : (a) RAND o número aleatorio, (b) SRES o respuesta y (c) Kc o clave de cifrado. La tripleta se utiliza para autenticar una llamada y para obtener las claves de cifrado del camino radio. Cuando un abonado móvil intenta acceder al sistema ya sea porque quiere hacer o recibir una llamada o porque cambia de VLR se arranca un proceso de autenticación.
- Registro de identificación de estaciones móviles (EIR-*Equipment Identity Register*). Es una base de datos que almacena la identidad internacional del equipo móvil (IMEI). Contiene 3 listas: blanca, gris y negra donde se clasifican datos relativos al equipo móvil tales como fabricante, número de serie, etc.

El sistema de conmutación realiza todas las funciones normales en telefonía como la gestión de llamadas, control de tráfico, análisis de numeración, tarificación y estadísticas de llamadas e incluye las siguientes unidades funcionales o nodos de red: MSC, HLR, VLR, AUC y EIR.

El sistema de estaciones base fundamentalmente es responsable de las funciones de radio en el sistema GSM: gestión de las comunicaciones de radio, manejo del traspaso de llamadas entre células en el área bajo su control, control del nivel de potencia de la señal tanto de las estaciones base como de las estaciones móviles e incluye los nodos de red: BSC y BTS.

El sistema de operaciones y mantenimiento es un sistema centralizado y remoto que proporciona los medios necesarios para poder llevar a cabo a una eficiente gestión de la red tanto de la parte de conmutación como de la parte de la radio. Las principales tareas que se llevan a cabo son: gestión de la red celular, administración de abonados, gestión de averías y medidas de funcionamiento de la red de conmutación y radio.

4.1.2 Interfaces GSM

La arquitectura del sistema GSM incluye tres interfaces estándar utilizadas para la señalización dentro del sistema de conmutación:

- La interfaz aire (Um): Es la conexión entre la estación móvil (MS) y la estación base (BTS). La señalización en esta interfaz usa un sistema específico de protocolo jerarquizado para GSM que utiliza las capas 1, 2 y 3 del modelo de referencia OSI, dicho protocolo recibe el nombre de LAPDm (Protocolo de Acceso de Enlace sobre el Canal Dm)
- La interfaz Abis: Es la conexión entre la BTS y el BSC y la señalización en esta interfaz es implementada como un esquema especial de la señalización por canal común, es decir uno de los canales se utiliza como canal de señalización según el protocolo de acceso de enlace sobre el canal D (LAPD).
- La interfaz A: Es el enlace entre el sistema de conmutación y el sistema de estaciones base. La señalización se lleva a cabo según la parte de aplicación del sistema de estaciones base que gestiona la asignación y liberación de los recursos de radio, traspaso de llamadas, control de llamadas y gestión de la movilidad.

Al ser un sistema híbrido (FM/TM), el sistema GSM organiza las transmisiones de radio, asignando portadoras (frecuencias centrales de los *slots* que se sitúan cada 200 kHz) y *time slots*, a los canales lógicos. La duración del *frame* es de 4.615 ms y cada *frame* es dividido en 8 *time slots* (como se muestra en la *Figura 4-2*).

4.1.3 Canales lógicos

Hay dos categorías de canales lógicos en GSM, los canales de tráfico y los canales de señalización. Los canales de señalización se dividen a la vez en tres grupos: canales *broadcast*, canales de control común y canales de control dedicados. (Ver *Tabla 4-1*).

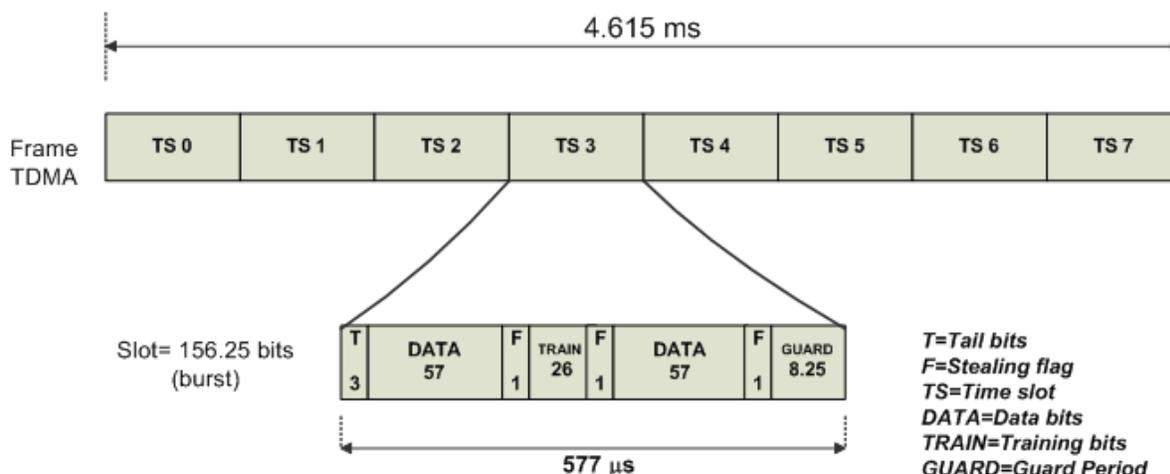


Figura 4-2. Frame GSM

Una estación base utiliza canales *broadcast* para transmitir la misma información a todas las terminales en una célula. Los tres tipos de canales broadcast son: el canal de control de broadcast (BCCH- *Broadcast Control Channel*), el canal de corrección de frecuencia (FCCH- *Frequency Control Channel*) y el canal de sincronización (SCH- *Synchronizing Channel*).

Grupo de canales	Nombre	Función
Canales <i>Broadcast</i>	BCCH	Control de difusión (<i>broadcast</i>)
	FCCH	Corrección de frecuencia
	SCH	Sincronización
Canales de Control Común	PCH	<i>Paging</i> (Búsqueda)
	AGCH	Acceso otorgado
	RACH	Acceso aleatorio
Canales de Control Dedicados	SDCCH	Control dedicado autónomo(<i>standalone</i>)
	SACCH	Control de asociación lenta
	FACCH	Control de asociación rápida

Tabla 4-1. Canales de señalización GSM

El canal de control común porta información hacia y desde terminales específicas. Existen tres distintos canales de control común.: El canal de *paging* (PCH- *Paging Channel*) y el canal de acceso otorgado (AGCH- *Access Grant Channel*), los cuales son canales de control de enlace hacia delante (*Forward Link Channels*) y finalmente el canal de acceso aleatorio. (RACH- *Random Access Channel*), que es el canal de control de enlace inverso o hacia atrás. (*Reverse Link Channel*).

Los canales de control dedicado usan físicamente canales que son asignados a terminales específicas. Hay tres tipos de canales de control dedicados: los canales de control dedicado autónomos (SDCCH- *Standalone Dedicated Control Channel*) que son utilizados

para transferir mensajes de señalización entre MS's y BSS's cuando una llamada no esta en progreso; y los canales de control de asociación lenta y de asociación rápida (SACCH- *Slow-Associated Control Channel* y FACCH- *Fast-Associated Control Channel*) los cuales son usados para la transmisión de mensajes de control entre las MS's y las estaciones base durante una llamada.

4.2 General Packet Radio Service (GPRS).

La *Figura 4-3* ilustra la arquitectura del sistema GPRS. Comparado con el sistema GSM, GPRS introduce 2 nuevos elementos, (que se encuentran sombreados en dicha figura) para crear un modo de transferencia de paquetes *end to end*. Además, el HLR es mejorado, añadiendo la información del suscriptor de datos GPRS y de ruteo. Se proveen dos servicios:

- Punto a Punto (PTP)
- Punto a Multipunto (PTM)

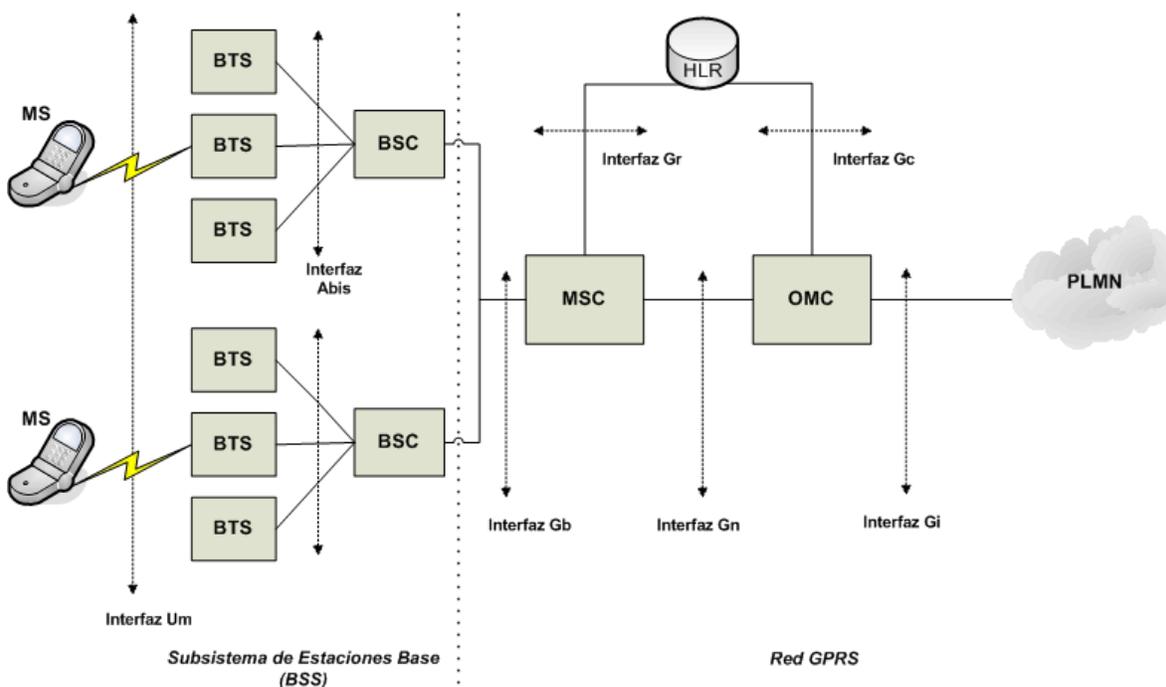


Figura 4-3. Arquitectura del sistema GPRS

Además e independientemente del ruteo de paquetes y la transferencia dentro de la red móvil pública terrestre (PLMN- *Public Land Mobile Network*), dentro es soportado un nuevo nodo de red lógico llamado el Nodo de Soporte GPRS (GSN-*GPRS Support Node*). El nodo de soporte de salida GPRS (GGSN- *Gateway GSM*) actúa como una interfaz lógica hacia las redes de paquetes de datos externas. El nodo de soporte de servicio GPRS (SGSN-*Service GSM*) es responsable por la entrega de paquetes a las MS's dentro de su área de servicio. Dentro de la red GPRS, las unidades de protocolo de datos (PDUs- *Protocol Data Units*) son encapsuladas en el GSN origen y desencapsuladas en el GSN destino.

Entre los GSNs el Protocolo de Internet (IP- *Internet Protocol*) es utilizado como el *backbone* para transferir PDUs. El proceso completo es definido como *tunneling* en GPRS. El GGSN también mantiene información de ruteo utilizada para tunelear los PDUs hacia el SGSN que está sirviendo en ese momento a la MS. Todos los datos GPRS relativos al usuario necesarios para que el SGSN desempeñe sus funciones de ruteo y transferencia de datos son almacenados dentro del HLR.

La *Figura 4-4* muestra un ejemplo simple de ruteo en una transmisión. El SGSN de la estación móvil fuente (SGSN-S (*source*)), encapsula los paquetes transmitidos por la MS y los rutea al correspondiente GGSN (GGSN-S). Basándose en la examinación de la dirección destino, los paquetes son entonces ruteados al GGSN-D (GGSN-*Destination*) a través de la red de paquetes de datos. El GGSN-D checa el contexto del ruteo asociado con la dirección destino y determina el SGSN sirviendo al destino (SGSN-D) y la información relevante al tuneleo. Cada paquete es entonces encapsulado y reenviado al SGSN-D, que lo entrega finalmente a la MS destino.

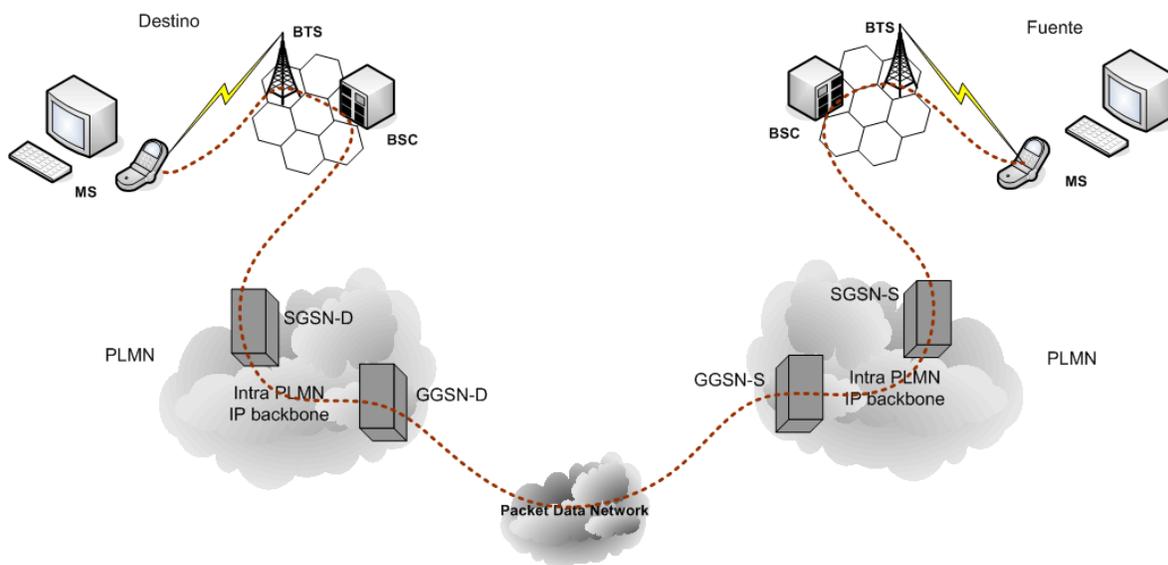


Figura 4-4. Ejemplo de ruteo en una red GPRS.

4.2.1 Arquitectura del protocolo.

La *Figura 4-5* muestra el plano de transmisión propuesto hasta la capa de red de acuerdo al modelo de referencia OSI. Por encima de la capa de red se pueden utilizar diversos protocolos o estándares pero dicha selección se encuentra fuera del alcance de la especificación GPRS.

Entre los dos GSNs, el protocolo de tunel GPRS (GTP-GPRS *Tunnel Protocol*) tunelea los PDUs a través del *backbone* de la red GPRS añadiendo información de ruteo. Bajo el GTP, el protocolo TCP/UDP (*Transmission Control Protocol/User Datagram Protocol*) y el protocolo IP son utilizados como los protocolos de la capa de red del *backbone* de la red GPRS. Los protocolos basados en Ethernet, ISDN y ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) pueden ser utilizados bajo IP dependiendo de la arquitectura de red del operador.

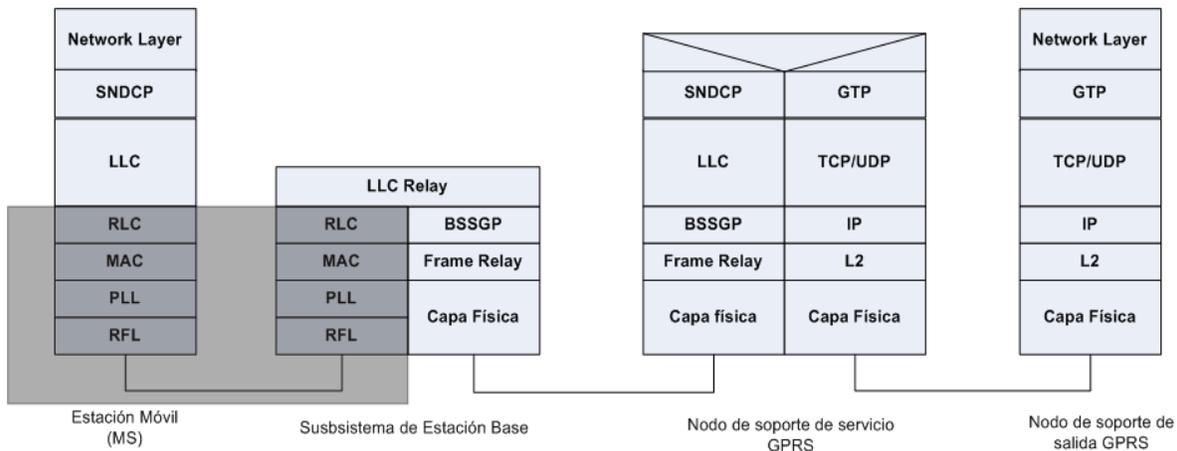


Figura 4-5. Plano de transmisión GPRS

Entre el SGSN y la MS, el protocolo SNDCP (*Subnetwork Dependent Convergence Protocol*) mapea las características del protocolo a nivel de red dentro del LLC (*Logical Link Control*) y provee funcionalidades tales como: el multiplexaje de los mensajes de la capa de red dentro de una conexión virtual lógica, la encriptación, la segmentación y la compresión.

Las radiocomunicaciones entre una MS y la red GPRS se encuentran indicadas por el área sombreada en la *Figura 4-5*, y cubren las funciones de las capas física y de enlace de datos.

Entre la MS y el BSS, la capa de enlace de datos ha sido separada a su vez en dos subcapas: La subcapa de control de enlace lógico (LLC) y la subcapa de control de enlace de radio/control de acceso al medio (RLC/MAC- *Radio Link Control/Medium Access Control*). La capa LLC es la subcapa superior de la capa de enlace de datos. Esta opera por encima de la capa RLC/MAC y provee el enlace lógico entre el MS y el SGSN. La funcionalidad del protocolo esta basada sobre el Procedimiento de Acceso al Enlace - D (LAPD-*Link Access Procedure D*) utilizado dentro del plano de señalización GSM con soporte para transmisión PTM.

La capa RLC/MAC provee servicios para la transferencia de información sobre la capa física de la interfaz de radio GPRS. Esta define el procedimiento para habilitar múltiples MS's, para compartir un medio de transmisión común que puede consistir de diversos canales físicos.

La capa RLC es responsable de la transmisión de los bloques de datos a través de la interfaz aire y del procedimiento de corrección de errores BEC (*Backward Error Correction*) el cuál consiste de una retransmisión selectiva de bloques incorregibles. (*ARQ-Automatic Repeat Request*)

La capa MAC por si misma es derivada de un protocolo ALOHA rasurado que opera entre la MS y la BTS. Es responsable por los procedimientos de acceso a la señalización, por los intentos de acceso al canal, por parte de las MS y por el control de ese acceso, por parte de la red. Este desempeña la función de contención entre los intentos de acceso al canal, la función de arbitraje entre múltiples solicitudes de servicio de diferentes MS y de la asignación al medio de los usuarios en respuesta a sus solicitudes de servicio.

La capa física esta separada a su vez, en la subcapa física de enlace (PLL- *Physical Link Layer*) y la subcapa física de RF (RFL-*RF Layer*)

La subcapa PLL provee servicios para transferir información sobre un canal físico entre la MS y la red. Esas funciones incluyen *framing* de las unidades de datos, codificación de los datos y detección y corrección de errores del medio de transmisión físico. PLL utiliza los servicios de RFL.

PLL es responsable por:

1. La codificación FEC (*Forward Error Correction*), permitiendo la detección y corrección de errores en las palabras transmitidas codificadas y en la señalización de palabras codificadas no corregibles.
2. El *interleaving* rectangular de un bloque de radio sobre 4 *burst* en *frames* TDMA consecutivos.
3. Los procedimientos de detección de congestiones en el enlace físico.

La subcapa RFL es parte de un sistema GSM completo, que entrega un rango de servicios incluyendo GPRS. RFL desempeña la modulación y demodulación de las formas de onda física y conforma la serie de recomendaciones GSM 05 que especifica entre otras cosas:

1. Las frecuencias portadoras y estructura del canal de radio GSM (GSM 05.02)
2. La modulación de formas de onda transmitidas y las tasas de flujo de datos de los canales GSM (GSM 05.04)
3. Características de transmisor y receptor y requerimientos de desempeño. (GSM 05.05)

En la red, la capa LLC es la separación entre el BSS y el SGSN .La funcionalidad del BSS es llamada LLC *relay*. Entre el BSS y el SGSN, el Protocolo GPRS BSS (BSSGP- *BSS GPRS Protocol*) transporta información de ruteo y de calidad de servicio (QoS- *Quality of Service*) y opera sobre el retardo del *frame*.

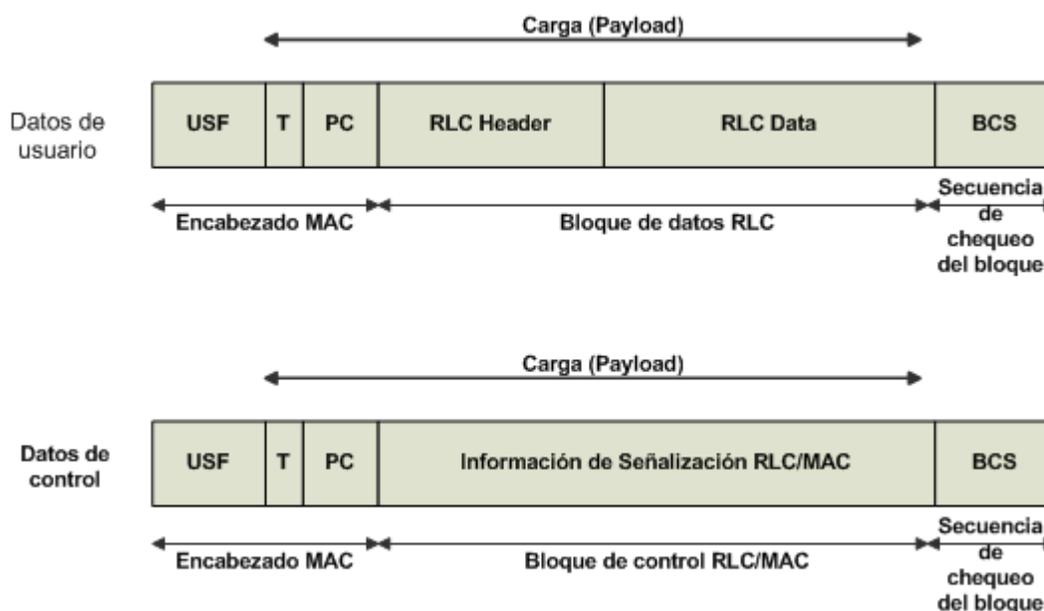


Figura 4-6. Estructura del bloque de radio GPRS

La *Figura 4-6* muestra la estructura de los bloques de radio de los datos de un usuario y de los datos de los mensajes de control. Cada bloque de radio consiste de un encabezado MAC, un bloque de datos RLC o un bloque de control RLC/MAC y una secuencia de chequeo de bloques (BCS-*Block Check Sequence*). Esto esta siempre conformado por 4 *bursts* (ráfagas) normales de datos.

El encabezado MAC consiste de los siguientes campos: una bandera de estado de enlace de subida (USF- *Uplink State Flag*), un indicador tipo bloque (T) y un control de potencia (PC- *Power Control*). El bloque de datos RLC consiste de un encabezado RLC y datos RLC. El bloque de control RLC/MAC contiene elementos de información de señalización RLC/MAC.



Figura 4-7. Procedimiento de codificación GPRS

La codificación del canal se encuentra especificada en GSM 05.03. Se contemplan 4 esquemas de codificación desde CS-1 hasta CS-4 y son definidos por los bloques de radio que portan a los bloques de datos RLC.

La *Figura 4-7* muestra el procedimiento de codificación donde la carga es definida en la *Figura 4-6*. Entre la MS, el BSS, y el SGSN, los mismos protocolos son utilizados para la transmisión de datos hacia el protocolo SMDCP. En la capa de red, un protocolo específico de manejo de movilidad es requerido dentro de la MS y el SGSN.

4.2.1.1 Proceso de codificación.

El proceso de codificación en la capa RLC/MAC ocurre de la siguiente forma:

Los datos RLC/MAC son transmitidos en bloques de radio, la estructura de los cuales es definida en la especificación GSM 04.60. Tanto los bloques de control (con información de señalización) como los bloques de datos (con información de datos del usuario) usan una estructura con un encabezado MAC de un octeto seguido por los datos RLC.

La estructura del encabezado MAC difiere entre los bloques de radio de *downlink* y *uplink*, y depende del tipo de datos en el bloque (ya sean datos de control o datos de usuario). Para datos de usuario se utiliza un encabezado RLC de dos bytes el cual es seguido por el campo de datos RLC que contienen el *payload* (carga), tal y como se muestra en la *Figura 4-8*.

El tamaño de los bloques de radio (N) depende del esquema de codificación utilizado cuando se transmite el bloque. El valor de N corresponde al número de *bytes* (octetos) y difiere entre los distintos esquemas de codificación de acuerdo a la *Tabla 4-2*. Un bloque de control se codifica siempre bajo el esquema CS-1 mientras los datos pueden ser codificados utilizando cualquiera de los 4 esquemas posibles.

	7	6	5	5	3	2	1	0	Bit no.
Octeto 1	Tipo de Payload						USF		Header MAC
Octeto 2									Header RLC
Octeto 3									
Octeto 4									
Octeto N									Payload RLC

Figura 4-8. Estructura del bloque de radio GPRS de downlink para la transmisión de datos de usuario.

Cada bloque de radio es ensamblado en forma diferente dependiendo del esquema de codificación utilizado. Sin embargo y sin importar el esquema, cada bloque de radio al final debe estar conformado por 456 bits de longitud para ajustarse dentro de los bursts GSM, como se explica más adelante.

Esquema de Codificación	N (incluyendo el encabezado MAC)	Tamaño del bloque de datos del payload RLC
CS-1	23	20
CS-2	33	30
CS-3	39	36
CS-4	53	50

Tabla 4-2. Tamaño del bloque por cada esquema de codificación

Antes de aplicar la codificación al canal, cada bloque de radio es ensamblado de acuerdo a la *Tabla 4-3*. Los *bits* añadidos son necesarios para adaptar el tamaño del bloque de radio al codificador del canal.

El USF es precodificado con un código de bloque en los casos de CS-2, CS-3 y CS-4 para detectar algunos errores en este. El BCS es un código de bloque para el bloque de radio completo que es utilizado para la detección de errores. La última columna muestra el número de bits totales por bloque de radio antes de que este sea puesto en el codificador del canal. CS-4 es un *bit* especial ya que ninguna codificación de canal es utilizada del todo; los bits son enviados a través de la interfaz de aire sin ninguna protección. El codificador del canal utilizado en CS-1, CS-2 y CS-3 es el mismo de tipo convolucional utilizado para la señalización en GSM

	Tamaño del bloque de radio	Bits de spare	Tamaño del bloque de radio sin USF	U S F	USF Pre-coded	BCS	Tail	No. Total de bits por bloque de radio
CS-1	23*8	0	23*8+0-3=181	3	3	40	4	181+3+40+4=228
CS-2	33*8	7	33*8+7-3=268	3	6	16	4	268+6+16+4=294
CS-3	39*8	3	39*8+3-3=312	3	6	16	4	312+6+16+4=337
CS-4	53*8	7	53*8+7-3=428	3	12	16	0	428+12+16+0=456

Tabla 4-3 Estructura del bloque de radio previa a la codificación del canal

El codificador duplica el número de bits en CS-1, CS-2 y CS-3 (tasa 1/2) pero deja CS-4 sin codificar. Para disminuir el número de bits a 456 tal y como es requerido, se utiliza *puncturing* en CS-2 y CS-3. El bloque de radio resultante está entonces listo para tomar el formato de un *burst*, tal y como se muestra en la *Tabla 4-4*

	Bits por RB	Code rate	Bits después de la codificación	Bits Punctured	Bits enviados
CS-1	228	1/2	228*2=456	0	456-0=456
CS-2	294	1/2	294*2=588	132	588-132=456
CS-3	338	1/2	338*2=676	220	676-220=456
CS-4	456	1	456*1=456	0	456-0=456

Tabla 4-4 Codificación de los bloques de radio en el canal, todos al final tienen 456 bits.

Como se explicó anteriormente y se ve en la *Tabla 4-4* todos los bloques GPRS al final deben contener 456 bits por *frame*, independientemente del esquema de codificación usado. Esos 456 bits son divididos en un número de *bursts* y son mapeados dentro de un *multiframe* de 52 *frames* (el número de *frames* puede variar). El primer paso es dividir los 456 bits en ocho partes de 56 bits cada una tal y como se muestra en la figura *Figura 4-9*

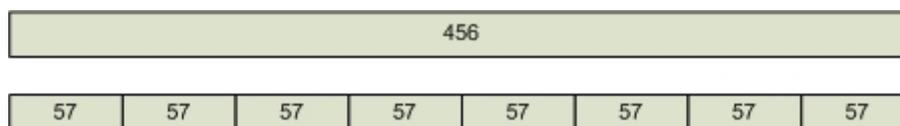


Figura 4-9. Los 456 bits totales de un bloque codificado son divididos en 8 bloques de 57 bits

Entonces los datos son insertados dentro de los *bursts*¹. La *Figura 4-10* muestra un *burst* “normal” en GSM (existen otros tipos de *bursts* cuyo estudio queda fuera del alcance de esta tesis). Como puede observarse el *burst* normal tiene espacio para dos segmentos de bits de datos por cada bloque de longitud de 57 bits



Figura 4-10. Estructura de un burst normal en GSM

Los ocho segmentos de 57 bits constituyen un bloque de radio que tomara 4 *bursts*. El *interleaving* es aplicado a 4 *bursts* a la vez. El mapeo exacto puede ser observado en la *Figura 4-11* donde ‘a’ – ‘l’ son bloques de radio GPRS.

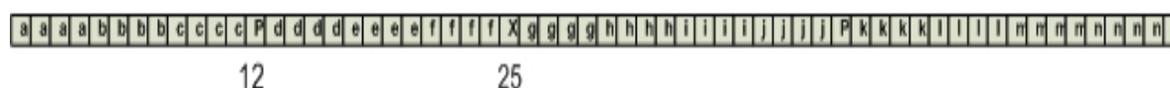


Figura 4-11. Distribución de los bloques de radio GPRS en un multiframe de 52 frames.

4.2.1.2 Cálculo del Throughput RLC

Ahora para calcular los bits por segundo que se transmiten, supondremos que en 1 byte hay bits y que hay 50 bloques de radio por segundo. Como se observo en la *Figura 4-11* hay 12 bloques por cada *multiframe* de 52 *frames*, un *multiframe* de este tipo dura exactamente 240 ms ($52 \cdot 120 / 26$), así hay 12 bloques cada 240 ms o $12 / .240 = 50$ bloques por segundo. Si algunos *time slots* son asignados, el *throughput* calculado debe ser multiplicado por el número de *time slots*.

- *Throughput del payload RLC*: Esta es la tasa a la cual la capa LLC puede recibir y enviar datos desde y hacia la capa RLC/MAC. Ver *Tabla 4-5*.

Esquema de codificación	N (incluyendo el encabezado MAC)	Tamaño del bloque de datos RLC (Payload bytes)	Throughput de datos RLC (bit/s) ²
CS-1	23	20	$20 \cdot 8 \cdot 50 = 8000$
CS-2	33	30	$30 \cdot 8 \cdot 50 = 12000$
CS-3	39	36	$36 \cdot 8 \cdot 50 = 14400$
CS-4	53	50	$50 \cdot 8 \cdot 50 = 20000$

Tabla 4-5 Calculo del throughput del payload RLC

¹ Un burst es la cadena de datos transmitidos en un time slot.

² El throughput de los datos RLC (Paykiad bits/s)=(Tamaños del bloque de datos RLC)*8*50

- *Throughput del bloque de radio sin USF.* Este es el *throughput* dentro de la capa RLC/MAC, con el encabezado RLC totalmente incluido (junto con el encabezado MAC), pero con la bandera de estado de *uplink* (USF) excluida. Los bits de *spare* añadidos para CS-2, CS-3 y CS-4 son también incluidos. Ver cálculo en la *Tabla 4-6.*

Esquema de codificación	N(incluyendo el encabezado MAC)	Tamaño del bloque de radio incluyendo los bits de spare pero excluyendo USF ³	Throughput del bloque de radio excluyendo USF (bit/s) ⁴
CS-1	23	$23*8+0-3=181$	$181*50=9050$
CS-2	33	$33*8+7-3=268$	$268*50=13400$
CS-3	39	$39*8+3-3=312$	$312*50=15600$
CS-4	53	$53*8+7-3=428$	$428*50=21400$

Tabla 4-6. Cálculo del throughput del bloque de radio sin USF.

- *Throughput del bloque de radio con bits de spare incluidos:* Este es el *throughput* dentro de la capa RLC/MAC donde el bloque de radio es incluido en su totalidad contando con el encabezado RLC/MAC y los bits de spare. Cálculo en la *Tabla 4-7.*

Esquema de codificación	N(incluyendo el encabezado MAC)	Tamaño del bloque de radio incluyendo los bits de spare	Throughput del bloque de radio (bit/s)
CS-1	23	$23*8+0=184$	$184*50=9200$
CS-2	33	$33*8+7=271$	$271*50=13550$
CS-3	39	$39*8+3=315$	$315*50=15750$
CS-4	53	$53*8+7=431$	$431*50=21550$

Tabla 4-7. Cálculo del throughput del radio bloque con los bits de spare incluidos.

- *Throughput del bloque de radio.* Este es el *throughput* dentro de la capa RLC/MAC donde se toma en cuenta el bloque de radio completo incluyendo el encabezado RLC/MAC pero excluyendo los bits de spare. Ver *Tabla 4-8.*

Esquema de codificación	N(incluyendo el encabezado MAC)	Tamaño del bloque de radio	Throughput del bloque de radio (bit/s)
CS-1	23	$23*8=184$	$184*50=9200$
CS-2	33	$33*8=264$	$264*50=13200$
CS-3	39	$39*8=312$	$312*50=15600$
CS-4	53	$53*8=424$	$424*50=21200$

Tabla 4-8. Cálculo del throughput del bloque de radio

³ Ver *Tabla 4-3*

⁴ Throughput (bit/s)= Tamaño del bloque de radio incluyendo los bits de spare pero excluyendo USF*50

La *Tabla 4-9* muestra los valores de *throughput* teóricos máximos para diferentes esquemas de codificación y número de *time slots*.

Número de timeslots	CS-1	CS-2	CS-3	CS-4
1	9200	13200	15600	21200
2	9200*2=18400	13200*2=26400	15600*2=31200	21200*2=42400
3	9200*3=27600	13200*3=39600	15600*3=46800	21200*3=63600
4	9200*4=36800	13200*4=52800	15600*4=62400	21200*4=84800

Tabla 4-9. Throughput máximo teórico (bit/s).

4.2.2 Protocolo GPRS de la interaz aire.

El protocolo de la interfaz aire GPRS se refiere a las comunicaciones entre la MS y el BSS en las capas física, MAC y de protocolo RLC, como se indica por las áreas sombreadas de la *Figura 4-5*. Las subcapas RLC/MAC permiten la multiplexación eficiente multiusuario sobre el canal de paquetes de datos compartido (PDCH- *Packet Data Channel*) y utiliza un protocolo ARQ selectivo para transmisiones confiables a través de la interfaz aire.

El canal físico dedicado al tráfico de paquetes de datos es llamado PDCH. Una célula que soporta que GPRS pueda asignar uno o mas PDCH compartidos los cuales son tomados de un conjunto común de canales físicos disponibles a la célula y de otra forma utilizados como canales de tráfico (TCHs- *Traffic Channels*). La asignación de canales de TCHs y PDCHs es hecha dinámicamente de acuerdo al principio de "capacidad sobre demanda" descrito a continuación.

- *Concepto Maestro-Esclavo:* Al menos un PDCH (mapeado sobre un *time slot* físico) actúa como un maestro, acomoda los canales de paquetes de control común (PCCCHs- *Packet Common Control Channels*) que portan toda la señalización de control necesaria para iniciar la transferencia de paquetes así como de los datos del usuario y la señalización dedicada. Los otros actúan como esclavos y son solamente utilizados para transferir datos de usuario.
- *Capacidad Sobre Demanda:* Este concepto se introduce para permitir el servicio GPRS en células donde existen pocos usuarios GPRS sin necesidad de tener asignados recursos de forma permanente. El operador puede decidir si dedicar algunos PDCHs para el tráfico GPRS. La supervisión de la carga se lleva a cabo en la capa MAC para monitorear la carga sobre los PDCHs y el numero de PDCHs asignados en una célula puede ser incrementado o decrementando de acuerdo a la demanda. Canales sin usar pueden ser asignados como PDCHs para incrementar la cobertura QoS para GPRS. Si otros servicios con prioridad mayor solicitan recursos una desasignación de PDCHs toma lugar.

Sin embargo la existencia de PDCHs no implica la existencia de PCCCH. Cuando ningún PCCCH es asignado en una célula todas las MS's sujetas a GPRS automáticamente acampan sobre el CCCH(*Common Control Channel*) GSM existente, al igual que lo hacen en el estado de espera (*idle*). Cuando un PCCCH es asignado en una célula todas las MS's sujetas al GPRS acampan sobre este.

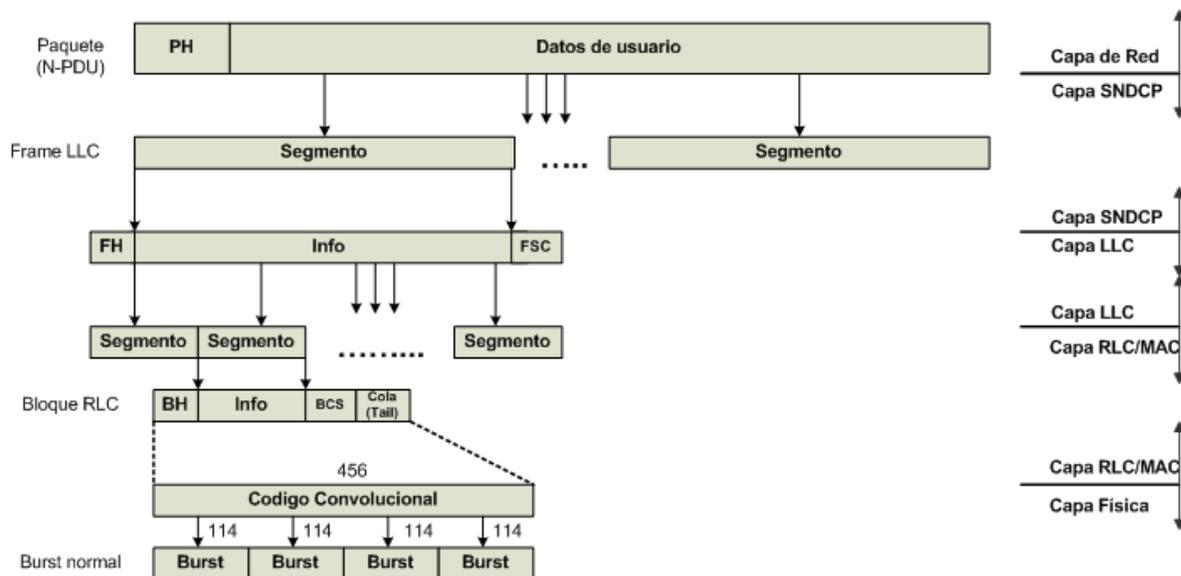
El PCCCH puede ser asignado ya sea como resultado del incremento en la demanda para transferir paquetes o bien cada vez que hay suficientes canales físicos en una célula. Si la red libera el PCCCH, las MS's regresan al CCCH.

- *Estructura Multiframe para PDCH.* Una estructura *multiframe* es necesaria para el PDCH para acomodar los grupos de búsqueda (*paging*) y quizá los bloques para enviar por broadcast la información del sistema GPRS. La estructura tanto de los 51 *frames* TDMA así como de los 52 *frames* TDMA esta especificada en GSM 05.01.

4.2.3 Flujo de datos.

Las unidades de datos del protocolo de la capa de red o paquetes (N-PDUs – *Network Packet Data Units*) recibidos de la capa de red son transmitidas a través de la interfaz aire entre la MS y el SGSN usando el protocolo LLC. Primero, el protocolo SNDCP transforma los paquetes en *frames* LLC. El proceso incluye de forma opcional: compresión de encabezado/datos, segmentación y encriptación. La cantidad máxima de datos de usuario en un frame LLC es 2 Kbytes.⁵

Un frame LLC es entonces segmentado en bloques de datos RLC que son formateados en la capa física. Cada bloque consta de 4 burst normales en frames TDMA consecutivos. La *Figura 4-12* resume el flujo de datos en GPRS.



PH (Packet Header): Encabezado de paquete
 FH (Frame Header): Encabezado de Frame
 BH (Block Header): Encabezado de bloque

FCS (Frequency Check Sequence): Secuencia de chequeo del frame.
 BCS (Block Check Sequence): Secuencia de chequeo del bloque.

Figura 4-12. Flujo de datos GPRS en la transformación del paquete.

⁵ En nuestro estudio.

4.2.4 Canales lógicos GPRS.

La *Tabla 4-10* lista los canales lógicos GPRS y sus funciones. A continuación se da una descripción detallada de cada canal.

- *Canales de Control de Broadcast de Paquetes:* El PBCCH (*Packet Broadcast Control Channel*) transmite información del sistema a todas las terminales GPRS en una célula.
- *Canales de Control Común de Paquetes:* El canal de acceso aleatorio de paquetes (PRACH- *Packet Random Access Channel*) es utilizado por las MSs para iniciar la transferencia de paquetes o responder los mensajes de *paging*. Sobre este canal las MSs transmiten *bursts* de acceso con tiempos largos de guarda. En la recepción de los *bursts* de acceso, el BSS asigna una ventaja de tiempo a cada MS.

El canal de búsqueda de paquetes (PPCH-*Packet Paging Channel*) es utilizado para numerar una MS antes de la transferencia de paquetes en el *downlink*.

El canal de acceso otorgado de paquetes (PAGCH- *Packet Access Grant Channel*) es utilizado en la fase de establecimiento de transferencia de paquetes para enviar el trabajo de los recursos a una MS antes de la transferencia de paquetes.

El canal de notificación de paquetes (PNCH-*Packet Notification Channel*) es utilizado para enviar una notificación *multicast* PTM (*PTM-M Point to Multipoint Multicast*) a un grupo de MS's previo a la transferencia de paquetes PTM-M. La notificación tiene la forma de una asignación de recursos para la transferencia de paquetes.

- *Canales de Tráfico de Paquetes:* El canal de transferencia de paquetes de datos (PDTCH-*Packet Data Transfer Channel*) es un canal asignado para transferencia de datos. Una MS puede usar más de un PDTCH en paralelo (operación *multislot*) para transferir paquetes individuales.

El canal de control asociado de paquetes (PACCH-*Packet Associated Control Channel*) es utilizado para transportar información de señalización relacionada a una MS dada así como *acknowledgments* (ACK) y control de potencia (PC). Este también porta asignaciones de los recursos y mensajes ya sea para la asignación de un PDTCH u ocurrencias lejanas de un PACCH. Una PACCH es asociado con uno o varios PDTCHs concurrentemente asignados a una MS.

Grupo	Nombre	Dirección	Función
PBCCH	PBCCH	<i>Downlink</i>	Difusión (<i>broadcast</i>)
PCCCH	PRACH	<i>Uplink</i>	Acceso aleatorio
	PPCH	<i>Downlink</i>	Búsqueda
	PAGCH	<i>Downlink</i>	Acceso otorgado
	PNCH	<i>Downlink</i>	Multicast
PTCH	PDTCH	<i>Downlink & Uplink</i>	Datos
	PACCH	<i>Downlink & Uplink</i>	Control Asociado

Tabla 4-10. Canales lógicos GPRS.

4.2.5 Modelo de operación.

El protocolo RLC/MAC propuesto es un protocolo tipo ARQ selectivo basado en mapas de bits con un mecanismo de reserva de paquetes basado en el acceso aleatorio del tipo ALOHA ranurado para la transmisión del *uplink*. La alta flexibilidad es asegurada, mediante la implementación de la operación de la capa MAC en *multislots*. Mas de un PDCH (cada uno correspondiente a un *time slot* en un *frame* TDMA) puede ser utilizado por una MS para transferir paquetes de datos.

La interfaz de radio GPRS consiste de canales de *uplink* y *downlink* asimétricos e independientes. En un cierto *time slot* TDMA, un PDCH de *uplink* puede portar datos de una MS y el PDCH de *downlink* portar datos de alguna otra MS,

Un paquete que será transmitido sobre la interfaz de aire es formateado dentro de uno o más *frames* LLC que son entonces segmentados dentro de bloques de datos RLC. Un protocolo selectivo ARQ entre la MS y el BSS provee retransmisión de los bloques erróneos. Cuando un *frame* completo es exitosamente transferido a través de la capa RLC, este es reenviado a la capa LLC.

El método de implementación selectivo ARQ a nivel RLC requiere enumeración de los *frames*. Cuando los *frames* LLC son segmentados, se asigna una identidad de *frame* temporal (TFI-*Temporary Frame Identity*) a cada dato del *frame* transmitido hacia o desde una MS. La TFI asignada es única entre las secuencias de *frames* transferidos de forma concurrente en una célula y básicamente reemplaza la combinación completa de la identidad de una MS (e.g. *Temporal Logical Link Identity* TLLI) y el número de secuencia del *frame*. La TFI es incluida en cada bloque que pertenece a un *frame* en particular, incluyendo los bloques retransmitidos determinados por el protocolo ARQ. Es más los bloques pertenecientes a *frames*, de o para diferentes MSs pueden ser multiplexados sobre el *downlink* o el *uplink* basándose en el TFI.

4.2.6 Transferencia de paquetes originada en el móvil.

- *Acceso múltiple*: Una MS inicia una transferencia de paquetes mediante la solicitud de un canal de paquetes sobre el PAGCH o el AGCH, respectivamente. Es posible usar métodos de acceso a paquetes de una o dos fases. La *Figura 4-13* ilustra el procedimiento de transferencia de datos en el enlace de subida (*uplink*). Los renglones punteados son mensajes adicionales necesarios para el procedimiento opcional que se lleva a cabo en el método de acceso de dos fases.

En el acceso de una fase, la red responde a la solicitud del canal de paquetes con una asignación inmediata del paquete, reservando recursos sobre los PDCHs para transferencia *uplink* de un número de bloques de radio.

En el acceso de dos fases, la red responde a la solicitud del canal de paquetes con la asignación inmediata del paquete, lo cual reserva recursos del *uplink* para transmitir la solicitud de recursos del paquete. El mensaje de solicitud de recursos del paquete porta la descripción completa de los recursos requeridos para la transferencia en el *uplink*. Luego la red responde con la asignación de recursos del paquete, reservando recursos para la transferencia de *uplink*.

Si no hay respuesta a la solicitud del canal del paquete dentro de un periodo de tiempo predefinido, la MS reintenta después de un tiempo aleatorio (*backoff*).

El tráfico de paquetes de datos es en ráfagas (*bursty*) por naturaleza. Momentáneamente, el BSS recibirá más solicitudes de la MS si el tiempo expira antes de que una asignación de recursos de paquete es recibido, la MS puede contender otra vez aún si la ultima solicitud de canal de paquete fue correctamente recibida. Esto podría encabezar una nueva onda de solicitudes de canal de paquetes. La solución propuesta para evitar esto, es notificar a la MS origen de la solicitud del canal de paquete, que su mensaje fue correctamente recibido y que recibirá una asignación de recursos de paquete mas tarde. En esta forma el sistema construye una cola de MS's que están en espera de su turno para recibir su asignación de recursos de paquetes para enviar un *frame*.

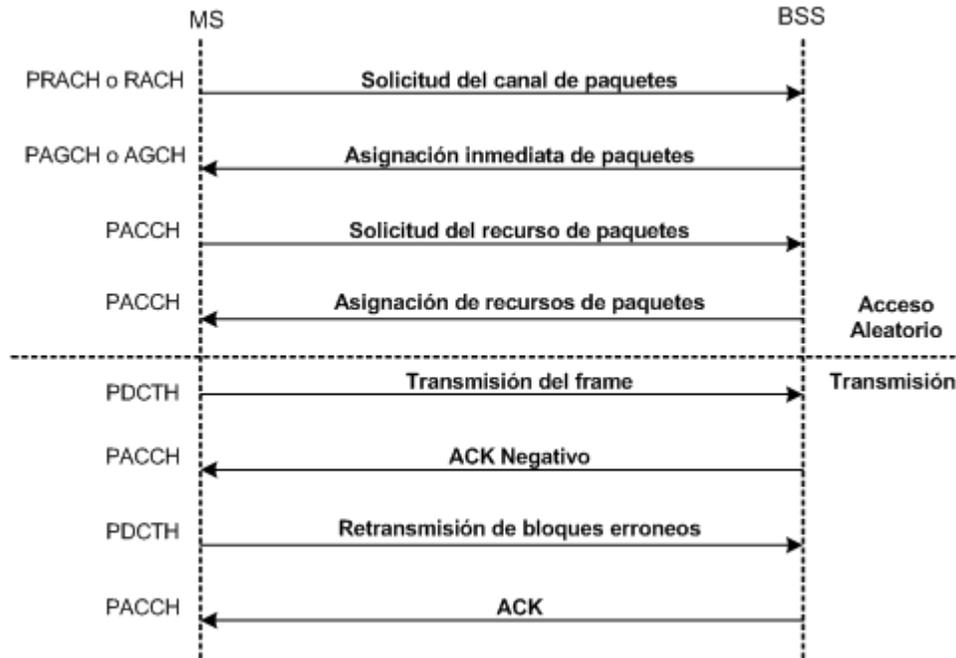


Figura 4-13. Acceso aleatorio en la capa MAC y transmisión para la transferencia de datos uplink.

- **Uplink Data Transfer:** La utilización eficiente y flexible del espectro disponible para el tráfico de paquetes de datos (uno o más PDCH en una célula) puede ser obtenida usando un esquema de reserva de canales *multislot*. Los bloques de una MS pueden ser enviados sobre diferentes PDCHs simultáneamente, esto reduce el retraso de los paquetes para la transmisión a través de la interfaz de aire. El ancho de banda puede ser variado asignando de uno a 8 *time slots* en cada *frame* TDMA dependiendo, del número de PDCHs disponibles, de las capacidades de la MS y de la carga del sistema en cuestión.

Como se menciona anteriormente, el concepto de canal maestro esclavo requiere ciertos mecanismos para eficientar la utilización del PDCH de uplink. Por lo tanto, la bandera de estado de *uplink* (USF) es utilizada sobre los PDCHs. La USF de 3 bits al comienzo de cada bloque de radio enviado sobre el *downlink* apunta al siguiente bloque de radio de *uplink*. Esto permite la codificación de 8 diferentes estados USF los cuales son usados para multiplexar el tráfico de *uplink*. El comando de reservación del canal incluye la lista de PDCHs asignados y el estado USF correspondiente por canal. Para una MS, la USF marca la parte del canal que ésta puede usar para la transmisión. Una MS monitorea la USF y de acuerdo al valor de esta bandera identifica los PDCHs asignados a esta y comienza la transmisión. Esto permite un

El procedimiento de búsqueda es seguido por la asignación de un recurso de paquetes para la transferencia del *frame* en el *downlink* conteniendo la lista de PDCHs a ser utilizados. La *Figura 4-15* ilustra los procedimientos de búsqueda y transferencia de paquetes.

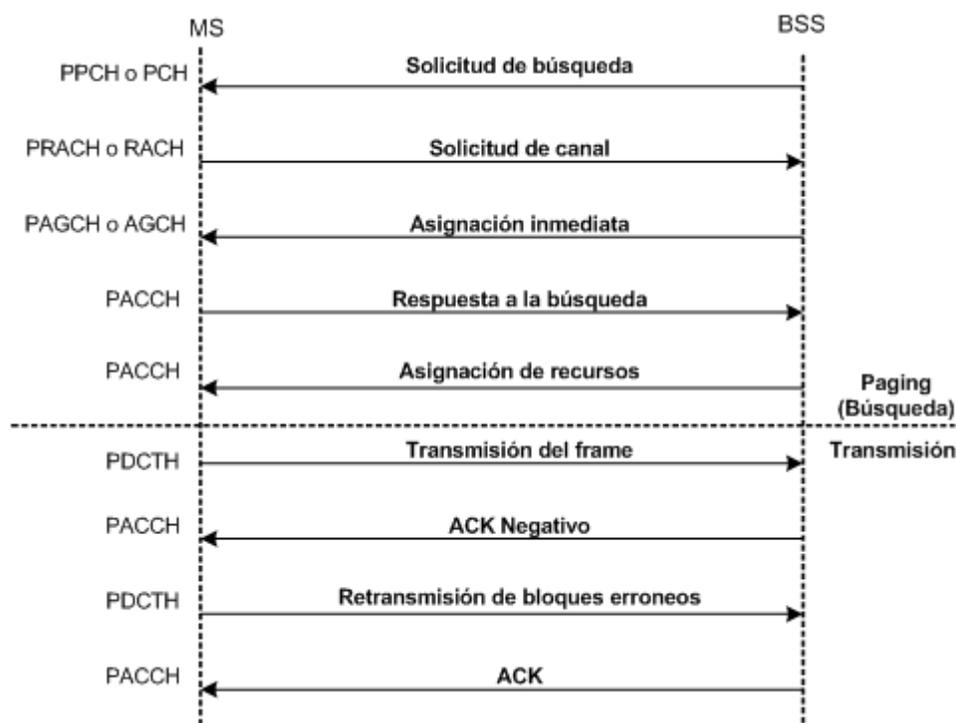


Figura 4-15. Capa MAC: Acceso aleatorio y transmisión para la transferencia de datos *downlink*

Debido a que un identificador (e.g. el TFI) es incluido en cada bloque de radio, es posible multiplexar bloques de radio destinados a diferentes MS's sobre el mismo PDCH del *downlink*. También es posible interrumpir la transmisión para una MS si un mensaje de control pendiente o un mensaje de datos de mayor prioridad son enviados a otras MS's. Es más, si más de un PDCH está disponible para el tráfico de *downlink* y la MS es capaz de monitorear múltiples PDCHs, los bloques pertenecientes al mismo *frame* pueden ser transferidos sobre diferentes PDCHs en paralelo.

La red obtiene ACKs para la transmisión de *downlink* mediante el escrutinio de la MS. La MS envía el mensaje de ACK/NACK en el bloque de radio reservado el cual es asignado en el proceso de escrutinio. En el caso de un NACK (*Negative ACK*) solo los bloques listados como erróneos son retransmitidos.

4.3 Resumen del capítulo

En este capítulo se describieron las tecnologías GSM y GPRS que pertenecen a la misma familia de estándares. Se dio una reseña de sus características principales así como de sus tecnologías de acceso, los elementos de sus redes, las capas del stack de protocolos y procesos de codificación. También se explica brevemente como ocurre la transmisión de datos entre la estación móvil y el subsistema de estaciones base, en los canales físicos.

5 Modelo analítico del sistema GPRS.

5.1 Análisis del *throughput* y *delay* de los sistemas GPRS.

El objetivo fundamental de este estudio es observar el desempeño del *throughput* y el *delay* del sistema GPRS como una función de varios parámetros tales como: número de *slots* de contención, número de usuarios y longitud de los mensajes a ser transmitidos.

Para entender mejor el desarrollo del modelo matemático debemos considerar algunos conceptos y procesos básicos de la transferencia de datos en la red GPRS.

Como sabemos el sistema GPRS es un sistema TDMA/FDMA que es capaz de transferir paquetes punto a punto. Un usuario de esta red que desea transmitir datos desde una estación móvil debe contender con otros usuarios para ganar el acceso al medio. Si su intento es exitoso se le asignan recursos, consistentes con la cantidad de datos a ser transferidos. La transmisión de datos de la red a la estación móvil es libre de contención y es encolada en la estación base.

El sistema GPRS consiste de dos partes: la alámbrica y la inalámbrica. La parte inalámbrica transporta los datos entre la estación móvil (MS) y el subsistema de estaciones base (BSS). La parte alámbrica envía los datos entre el BSS y un ruteador en la frontera de una red de comunicaciones de datos estándar. Para el propósito de este estudio solo nos enfocaremos en la parte inalámbrica de la red.

Una MS deseando usar los servicios GPRS, en primer lugar se añade a la red utilizando un procedimiento de señalización el cual ocurre, ya sea cuando la MS es encendida o cuando el usuario desea transferir paquetes de datos. Así, el número de sistemas finales elegibles para la transmisión sobre el sistema inalámbrico es controlado por el sistema. El acceso al canal inverso para propósitos de transmisión de datos es obtenido, reservando capacidad mediante un proceso de contención.

El tiempo sobre el canal de transmisión inalámbrica es organizado como una secuencia de *multiframe*s los cuales pueden tener cada uno 26, 51 o 52 *frames*. Cada *frame* tiene 8 *time slots*, cada uno de los cuales puede transmitir una unidad de datos llamada *burst* (ráfaga), el cual contiene 114 bits. Un paquete de reservación puede ser enviado en un *time slot*, pero la transmisión de una unidad básica de datos, un bloque RLC, requiere cuatro *bursts* (o un *time slot* en 4 *frames* consecutivos).

En la MS los paquetes llegan al sistema GPRS desde un protocolo de la capa de red tal como IP. Esos paquetes de datos, los cuales en caso de IP incluyen 20 *bytes* de *overhead* son primero transformados en *frames* LLC por el SNDCP. La cantidad de datos del usuario en un LLC *frame* es máximo de 1600 *bytes* y un encabezado (*header*) de 40 *bytes* es añadido a cada LLC *frame*. Después son segmentados en bloques RLC en la subcapa RLC/MAC. Cada bloque RLC que contiene cerca de 20 *bytes* de un *frame* LLC es entonces codificado y transmitido sobre la interfaz de aire en 4 *time slots*, tal y como se describió en el párrafo anterior.

El tiempo gastado por un bloque RLC, es aproximadamente 18.5 ms o de manera equivalente, el tiempo de un *frame* es cerca de 4.625 ms. La capacidad de transmisión resultante de un *time slot* depende de la tasa de codificación utilizada.

Para una tasa de 1/1 la capacidad es 21.4 kb/s, mientras que para una tasa de 1/2, la capacidad instantánea de transmisión es 9.05 kb/s por *slot*.

El ancho de banda sobre demanda, puede obtenerse asignando *time slots* paralelos. Por ejemplo si usamos 8 *time slots* simultáneos la tasa de transmisión que puede alcanzarse es de 160 kb/s.

La secuencia de acciones involucradas en una transferencia de datos entre una MS y un BSS se describen a continuación: La estación móvil inicia una transferencia de paquetes mediante una solicitud del canal (*PCR- Packet Channel Request*) en un slot de contención del canal de acceso aleatorio (*PRACH- Packet Random Access Channel*). Hay dos métodos de acceso de paquetes: el de una y el de dos fases.

En el acceso de una fase, la red responde al PCR con un mensaje de asignación inmediata (*PIA- Packet Immediate Assignment*) sobre el canal de acceso otorgado (*PAGCH*), reservando recursos sobre los canales de datos (*PDCH's*) para la transferencia de un número de radiobloques. Los recursos reservados se especifican entonces en el PCR. En el acceso de dos fases, el PCR responde mediante un PIA que reserva los recursos de uplink, transmitiendo una solicitud de recursos (*PRR- Packet Resource Request*) El mensaje PRR porta una descripción completa de los recursos solicitados para la transferencia uplink. La red entonces responde con una asignación de paquetes (*PRA- Packet Request Assignment*) reservando recursos para la transferencia *uplink*. Si la MS no recibe alguna respuesta a su mensaje PCR dentro de un intervalo específico de tiempo, este espera por un intervalo aleatorio de tiempo y lo intenta nuevamente.

En la dirección BSS – MS la red inicia la transferencia de paquetes hacia la MS que está en estado de espera (*standby*) enviando una solicitud de paging (*PPReq- Packet Paging Request*) sobre el canal de *paging*. La MS responde enviando una respuesta de paging (*PPRes- Packet Paging Response*). El mensaje PPRes contiene un identificador único conocido como el identificador temporal de la capa de enlace (*TLLI- Temporary Link Layer Identifier*) así como un frame LLC completo. El procedimiento de *paging* es seguido por la asignación, que reserva recursos sobre el canal de tráfico de datos (*PDTCH- Packet Data Traffic Channel*). La asignación de recursos es seguida por los procedimientos de transferencia.

Además debemos tomar en cuenta las siguientes asunciones:

1. La tasa de llegada (recepción) de los mensajes de reservación es dependiente del estado y por tanto, el éxito es determinado de acuerdo al modelo de captura. Es decir, asumimos que una solicitud de reservación puede ser exitosa aún si múltiples solicitudes ocurren en el mismo *time slot*.
2. La ocupación del sistema nunca puede exceder un número finito K. Es decir el número de mensajes que pueden ser encolados no se considera ilimitado .

5.1.1 Modelo matemático para el cálculo del *throughput* y el *delay*.

En este apartado detallaremos el modelo seguido para simular el desempeño del *throughput* y el *delay* de la red GPRS.

En primer lugar consideremos un número fijo de usuarios, U , cada uno de los cuales tiene una sesión en operación continua.

Cada sesión es un ciclo continuo (*loop*) que posee cuatro fases: *think*, contención, espera (*wait*) y transmisión.

En este modelo iterativo de dos niveles se hace una aproximación para calcular el tiempo de espera (*wait*) de un cliente y el *throughput* del sistema los cuales se encuentran cercanamente relacionados.

Asumimos inicialmente que el tiempo de espera promedio del cliente y la probabilidad de que un cliente arbitrariamente contienda exitosamente son conocidos. Basados en esta asunción inicial hacemos algunas otras asunciones simplificadas acerca del comportamiento del sistema y las utilizamos para iterar sobre la probabilidad de contención exitosa hasta que el parámetro converge en un tiempo de espera que permanece constante. Posteriormente se lleva a cabo un chequeo de viabilidad y usamos los resultados de esos chequeos para ajustar nuestra aproximación para el tiempo de espera medio y repetimos el proceso. Así a nivel interno iteramos sobre la probabilidad de que un usuario contienda exitosamente y a nivel externo iteramos sobre el valor medio del nuevo tiempo de espera.

Aunque no es una parte restrictiva del análisis, escogeremos un *multiframe* con estructura de 52 frames de GPRS, siempre que necesitemos usar opciones específicas de parámetros en nuestra discusión. Este *multiframe* se encuentra compuesto de 13 bloques de 4 frames cada uno. Se asume que los *slots* de contención estarán en el primer bloque de cada *multiframe*. Es decir hay $R \in \{1,2,\dots,32\}$ slots de contención, siendo el valor actual un parámetro del sistema. Conceptualmente los R slots de contención son asignados a los primeros $\lceil R/4 \rceil$ *time slots* del primer bloque de cada *multiframe*. Los *time slots* asignados a la contención no son asignables para la transmisión de mensajes. (Ver Figura 5-1)

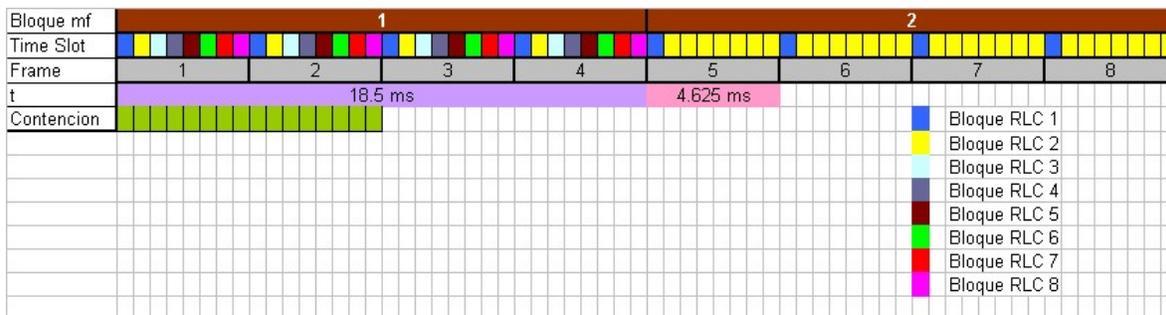


Figura 5-1. Estructura del multiframe-52 de GPRS utilizado.

El ciclo del comportamiento del usuario es como sigue: Inicialmente el usuario esta en un estado de *think*. Inmediatamente al completar el estado de *think*, el usuario entra al estado de contención. El usuario espera por el primer intervalo de contención y entonces contienda en ese intervalo y todos los consecuentes hasta tener éxito.

Comenzando en el bloque inmediato siguiente a la contención exitosa, si se encuentra capacidad disponible, puede ser asignada en unidades de uno a 8 *time slots* por bloque. Si ninguna capacidad esta disponible, el contendiente exitoso espera a que llegue a haber capacidad de transmisión disponible. El usuario entonces transmite en bloques sucesivos hasta que la transmisión se completa. Una vez que esto sucede, el usuario entra nuevamente al estado de *think* y el ciclo se repite.

Según el artículo de V. Chitre [39], vamos a denotar \bar{t} , \bar{c} , \bar{w} y \bar{x} como las longitudes de los tiempos de *think*, el periodo de contención, el tiempo de espera combinado para la contención y la transmisión y el periodo de transmisión del mensaje respectivamente; donde todas las longitudes están dadas en términos de bloques RLC. Y denotaremos la longitud del ciclo total con \bar{z} . Entonces:

$$E[\bar{z}] = E[\bar{t}] + E[\bar{c}] + E[\bar{w}] + E[\bar{x}] \quad (1)$$

Ahora cada usuario envía exactamente un mensaje por ciclo. El término \bar{x} se refiere al número de bloques RLC necesarios para transmitir un mensaje, el cual es obtenido procesando la variable aleatoria \bar{m} la cual denota la longitud del mensaje en bytes. El grueso del *throughput* del sistema es definido como la proporción de todos los bloques, incluyendo el *overhead* para los *slots* de contención que son usados para transmitir los mensajes.

$$\rho = \frac{UE[\bar{x}]}{E[\bar{z}]} \quad (2)$$

Bajo esta definición de \bar{z} , todo el tiempo durante la transmisión del mensaje actual que no es utilizado en transmitir paquetes es incluido en la variable \bar{w} .

La esperanza $E[\bar{x}]$ puede ser calculada directamente de la distribución de la longitud del mensaje, tomando en cuenta el *stack* de protocolos y el *overhead* asociado. Similarmente \bar{t} es una distribución prescrita con esperanza conocida. Pero $E[\bar{c}]$ y $E[\bar{w}]$ son desconocidas. Así que la tarea es calcular esas cantidades.

Si $E[\bar{w}]$ fuese conocida entonces la única variable desconocida sería $E[\bar{c}]$, asumimos que la probabilidad de una contención exitosa para un usuario arbitrario, P_c , es conocida. Aunque la secuencia de contención no es una secuencia de intentos independientes de Bernoulli, asumiremos que sí es el caso. Bajo esta asunción el número de contenciones requeridas para que un usuario alcance éxito tiene la distribución geométrica con parámetro P_c . Si un usuario contiene exitosamente sobre el primer *slot* entonces el tiempo de contención es exactamente un bloque RLC pero cada contención adicional requiere de un *frame* entero de *overhead* por usuario. Así encontramos que :

$$E[\bar{c}] \approx \left[1 + \frac{1 - P_c}{P_c} F \right] \quad (3)$$

donde F denota el numero de bloques RLC por *multiframe*. Notamos que un usuario completa el periodo de think en cualquier parte dentro del *multiframe* y debe esperar el comienzo de un bloque de contención para poder contender, por lo tanto ese tiempo es también tomado en cuenta en la variable del tiempo de espera \bar{w} . Dada la supuesta $E[\bar{w}]$ y la recién calculada $E[\bar{c}]$ podemos obtener ahora $E[\bar{z}]$ y a partir de esta determinar el número promedio de periodos de contención por ciclo.

Específicamente si suponemos a N como el número de ciclos, b_{z_i} como el número de bloques de contención en el ciclo i y z_i como el número de bloques RLC en el ciclo i . Entonces en N ciclos, el número total de bloques RLC será $\sum_{i=1}^N z_i$ y el número total de bloques de contención será $\sum_{i=1}^N b_{z_i}$. Así, la razón del número de bloques de contención al número de bloques total es $\left| \frac{\sum_{i=1}^N z_i}{\sum_{i=1}^N b_{z_i}} \right|$ y el promedio a largo plazo es $1/F$, por lo que:

$$\begin{aligned} \frac{1}{F} &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^N b_{z_i}}{\sum_{i=1}^N z_i} \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_{z_i}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i} \\ &= \frac{E[\bar{b}_z]}{E[\bar{z}]} \end{aligned} \tag{4}$$

$$E[\bar{b}_z] = \frac{1}{F} E[\bar{z}]$$

Definiendo \bar{u} como el número de contendientes en un bloque de contención y \bar{s} como el número de contendientes exitosos por bloque y haciendo un razonamiento similar al anterior es fácil ver que la proporción de usuarios que contienden exitosamente esta dada por la razón de $E[\bar{s}]$ a $E[\bar{u}]$. Pero esto es también la probabilidad de que un cliente seleccionado arbitrariamente contienda exitosamente sobre cada conexión. Así:

$$P_c = \frac{E[\bar{s}]}{E[\bar{u}]} \tag{5}$$

Similarmente, podemos demostrar que

$$E[\bar{s}] = \frac{U}{E[b_z]} = \frac{UF}{E[\bar{z}]} \tag{6}$$

donde el ultimo paso proviene de la ecuación 4

Definimos P_U como la proporción de usuarios conteniendo en cada bloque de contención. Así desde que $E[\bar{u}] = P_U U$, y con las ecuaciones 5 y 6 encontramos que

$$P_U = \frac{E[\bar{s}]}{UP_C} = \frac{F}{E[\bar{z}]P_C} \quad (7)$$

Ahora cada usuario que se encuentra actualmente en el modo de contención, contiene en cada bloque de contención hasta lograr el éxito y en un periodo de conexión dado. El número de usuarios conteniendo es una variable aleatoria \bar{u} , teniendo el conjunto de soporte $\{0, \dots, U\}$. Cada uno de los usuarios conteniendo escoge un *slot* de contención, aleatoria e independientemente de los otros usuarios del conjunto de los R *slots* de contención. Definiendo \bar{n} como el número de usuarios escogiendo un *slot* r , donde r es un *slot* arbitrario. Entonces, $\bar{n}/\bar{u} = u$ es una variable aleatoria binomial con parámetros u y $1/R$, por tanto:

$$P\{\bar{n} = n/\bar{u} = u\} = \binom{u}{n} \left(\frac{1}{R}\right)^n \left(1 - \frac{1}{R}\right)^{u-n} \quad (8)$$

En un *slot* de contención dado, generalmente un usuario puede ser exitoso y la probabilidad de que sea exitoso es especificada por el modelo de captura asumido. Denotamos S como el evento de una contención exitosa y la probabilidad del evento como P_S . Asumimos que la captura por algún contendedor es posible, considerando que el número de contendientes no sea mas grande de cinco usuarios y adoptando las probabilidades de captura expresadas en la *Tabla 5-1*.

Probabilidad de captura $P\{S / \bar{n} = n\}$	Número de contendientes $\bar{n} = n$
1	1
0.67	2
0.48	3
0.40	4
0.35	5

Tabla 5-1. Probabilidades de Captura.

Suponiendo que algún usuario es exitoso en un *slot* dado, el usuario específico que contiene exitosamente es escogido al azar de entre los contendientes con igual probabilidad.

S describe el evento de que la contención en un *slot* sea exitosa. Así de la teoría de la probabilidad, encontramos que la probabilidad de una contención exitosa en un *slot* arbitrario, dado un total de u contendientes en el bloque, esta definida por:

$$\begin{aligned}
 P\{S / \bar{u} = u\} &= \sum_{n=0}^u P\{S / \bar{u} = u, \bar{n} = n\} P\{\bar{n} = n / \bar{u} = u\} \\
 &= \sum_{n=0}^u P\{S / \bar{n} = n\} P\{\bar{n} = n / \bar{u} = u\}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

En cambio ,

$$P_S = P\{S\} = \sum_{u=0}^U P\{S / \bar{u} = u\} P\{\bar{u} = u\}
 \tag{10}$$

Debido a que hay R slots de contención,

$$P_S = E[\text{número de exitos en el slot } i]
 \tag{11}$$

y el valor estimado de la suma determinista de variables aleatorias es siempre igual a la suma de valores esperados de las variables aleatorias individuales, ya sea que las variables aleatorias en la suma sean o no independientes. El numero esperado de contenciones exitosas en un bloque esta dado por:

$$E[\bar{s}] = RP_S,
 \tag{12}$$

donde la probabilidad requerida es calculada de la ecuación 8 a 10. Entonces de la ecuación 5 tenemos que

$$P_C = \frac{RP_S}{UP_U}
 \tag{13}$$

Como la distribución de \bar{u} no es conocida, supondremos que \bar{u} tiene una distribución binomial con parámetros U y P_U en la ecuación 10. Por lo que dada la distribución de \bar{u} podemos calcular $E[\bar{u}]$ y $E[\bar{s}]$ y podemos usar la ecuación 13 para encontrar una nueva aproximación de P_C . Usamos esta nueva aproximación de P_C e iteramos comenzando con la ecuación 3 hasta encontrar un valor consistente de P_C , que implica obtener $E[\bar{c}]$.

Hasta este punto tenemos un método iterativo para encontrar un valor consistente de P_C dado un valor estimado de $E[\bar{w}]$. Para propósitos de indexación utilizaremos los subíndices i y j para los niveles iterativos externo e interno respectivamente.

Resumiendo:

1. Inicializamos valores:

a. $i = j = 0$

b. Establecemos $E_i[\bar{w}]$ y P_{Cij} en sus estimados iniciales.

Para comenzar el proceso iterativo, establecemos P_{C00} a un valor arbitrario elegido; típicamente utilizamos $P_{C00}=0.3$, pero la elección de este valor inicial en realidad no afecta la velocidad de convergencia. Por otro lado, debemos tener un cuidado especial al asignar $E_0[\bar{w}]$. Específicamente fijaremos $E_0[\bar{w}]$ en su valor mínimo posible tomando en cuenta que el ciclo del usuario no puede ser menor que la suma de los tiempos requeridos para contender, transmitir el mensaje, el tiempo de *think* y el tiempo de espera (wait) para el siguiente periodo. De esta forma estableceremos $E_0[\bar{w}]=0$. La idea es tomar en cuenta todos los factores posibles que pueden influenciar la longitud mínima de un ciclo calculando la longitud mínima posible del ciclo basados sobre las asunciones mas restrictivas y entonces sustraer el tiempo de servicio y el tiempo de *think* para obtener el tiempo mínimo de espera. Es importante obtener resultados razonables cuando hay un número de usuarios pequeños donde el *throughput* que puede ser alcanzado es limitado sobre todo por la inhabilidad de los usuarios combinados de generar tráfico más que por la inhabilidad del sistema de manejar la carga.

2. Con $E_i[\bar{w}]$ fija hacemos la siguiente iteración interna para j con i fija.

a. Usamos P_{Cij} para encontrar $E_{ij}[\bar{c}]$

$$E_{ij}[\bar{c}] = 1 + \frac{1 - P_{Cij}}{P_{Cij}} F$$

b. Usamos $E_{ij}[\bar{c}]$ en 1 para encontrar $E_{ij}[\bar{z}]$

$$E_{ij}[\bar{z}] = E_{ij}[\bar{c}] + E_i[\bar{w}] + E[\bar{x}]$$

c. Con P_{Cij} y $E_{ij}[\bar{z}]$ en 7 encontramos P_{Uij}

$$P_{Uij} = \frac{F}{E_{ij}[\bar{z}]P_{ij}[\bar{c}]}$$

d. Utilizamos P_{Uij} de la ecuación 8 a 10 para encontrar P_{Sij}

Sabemos que :

$$P_{Sij} = P\{S\} = \sum_{u=0}^U P\{S / \bar{u} = u\} P\{\bar{u} = u\}$$

y dado que:

$$P\{\bar{u} = u\} = \binom{U}{u} (Pu_{ij})^u (1 - Pu_{ij})^{U-u}$$

y

$$P\{S / \bar{u} = u\} = \sum_{n=0}^u P\{S / \bar{n} = n\} P\{\bar{n} = n / \bar{u} = u\} = \sum_{n=0}^u P_{\text{captura}} P_{\text{binomial}}$$

donde

$$P_{\text{captura}} = P\{S / \bar{n} = n\}$$

que se obtiene de la *tabla 5-1* y

$$P_{\text{binomial}} = P\{\bar{n} = n / \bar{u} = u\} = \binom{u}{n} \left(\frac{1}{R}\right)^n \left(1 - \frac{1}{R}\right)^{u-n}$$

finalmente obtenemos así que:

$$P_{Sij} = P\{S\} = \sum_{u=0}^U \left\{ \sum_{n=0}^u P_{\text{captura}} P_{\text{binomial}} \right\} P_{Uij}$$

e. Con P_{Sij} y P_{Uij} en la *ecuación 13* encontramos P_{Cij+1}

$$P_{Cij+1} = \frac{RP_{Sij}}{UP_{Uij}}$$

f. Comparamos P_{Cij+1} con P_{Cij} para determinar si se requieren mas iteraciones

Si $P_{Cij+1} - P_{Cij} > \text{delta}$ entonces se necesitan más iteraciones e incrementamos j para una $E_i[\bar{w}]$ fija y repetimos el proceso desde el paso 2a.

Si $P_{Cij+1} - P_{Cij} \leq \text{delta}$ entonces continuamos con el paso 3.

3. Comparamos la parte del usuario de los bloques disponibles para la transmisión del mensaje con la de los requerimientos del usuario. Para esto seguimos los siguientes procedimientos:

Una vez que P_C converge para el valor dado de $E[\bar{w}]$, calculamos el número promedio de bloques disponibles a cada usuario durante la longitud de un ciclo promedio en bloques

RLC y conocemos el número promedio de esos bloques que son utilizados por los bloques de contención. Por lo que, el número de bloques disponibles por usuario para la transmisión se define como el número de bloques totales menos el número de bloques de contención utilizados por la capacidad paralela entre el número total de usuarios.

$$E_{dU} = \frac{E[\bar{z}] - (E[\bar{b}_z] * R / 32) * cp}{U}$$

donde $cp=8$ ya que existen 8 bloques RLC dentro de un bloque del *multiframe*. Y de la ecuación 6

$$E[\bar{b}_z] = \frac{U}{E[S]} = \frac{U}{RP_s}$$

También conocemos que los requerimientos de cada usuario son $E[\bar{x}]$ y que existen U usuarios. Por tanto, el número total de bloques requeridos de transmisión por usuario se define como

$$E_{req} = E[\bar{x}]$$

Y finalmente llevamos a cabo la comparación:

Si $E_{req} \leq E_{dU}$ entonces terminamos las iteraciones y con los valores de $E_i[\bar{w}]$ y $E_{ij}[\bar{c}]$ obtenidos hasta ese momento se calcula $E[\bar{z}]$ y por consiguiente el *throughput* y *delay* del sistema.

En caso de que $E_{req} > E_{dU}$ debido a que la parte de recursos disponibles que los usuarios comparten debe ser estrictamente más grande que la cantidad requerida para transmitir los mensajes de los usuarios, se deberá incrementar el estimado $E[\bar{w}]$ por más de la diferencia entre E_{dU} y $E[\bar{x}]$. En nuestro programa de computadora, arbitrariamente elegimos actualizarlo como sigue:

$$E_{i+1}[\bar{w}] = E_i[\bar{w}] + E[\bar{x}] - E_{du} \quad (14)$$

E iniciamos nuevamente el paso 2.

5.1.2 Resultados.

Realizando el programa de computadora¹ que realiza este proceso iterativo podemos encontrar los siguientes resultados:

1. En primer lugar simulamos el comportamiento del *throughput* desde 2 hasta 100 usuarios utilizando como parámetro el número de *slots* de contención, considerando como valores posibles desde $R=8$ hasta 32

¹ Para consultar el programa utilizado para obtener los resultados favor de dirigirse al Apéndice A.

Cabe mencionar que estas sesiones se consideran continuas y reservadas y por tanto el tiempo de *think* es considerado nulo y el tiempo de espera inicial es solo 1 bloque RLC.

Por otro lado la longitud en bloques RLC del mensaje se calcula de la siguiente forma para todos los casos²:

- a. A los datos del usuario en bytes le agregamos el encabezado IP que es de 20 bytes. Con esto formamos el *frame* SNDTCP. En el caso de este estudio no sobrepasaremos el límite máximo de datos a utilizar en el *frame* LLC que es de 1600 por lo cual omitiremos el procedimiento para la codificación en estos casos.
- b. Tomamos los datos del *frame* SNDTCP y añadimos el encabezado LLC de 40 bytes para formar el *frame* LLC
- c. Del *frame* LLC vamos tomando de 20 en 20 bytes para formar los bloques RLC.
- d. Una vez obtenido el número total de bloques RLC, lo dividimos entre los bloques disponibles dentro del *multiframe*, si el resultado es mayor o igual a uno, lo sumamos a la cantidad de bloques RLC ya que debemos tomar en cuenta el número de bloques de contención que estamos utilizando inicialmente para transmisión.

Una vez entendido este proceso, se muestran los resultados obtenidos en la primera simulación.

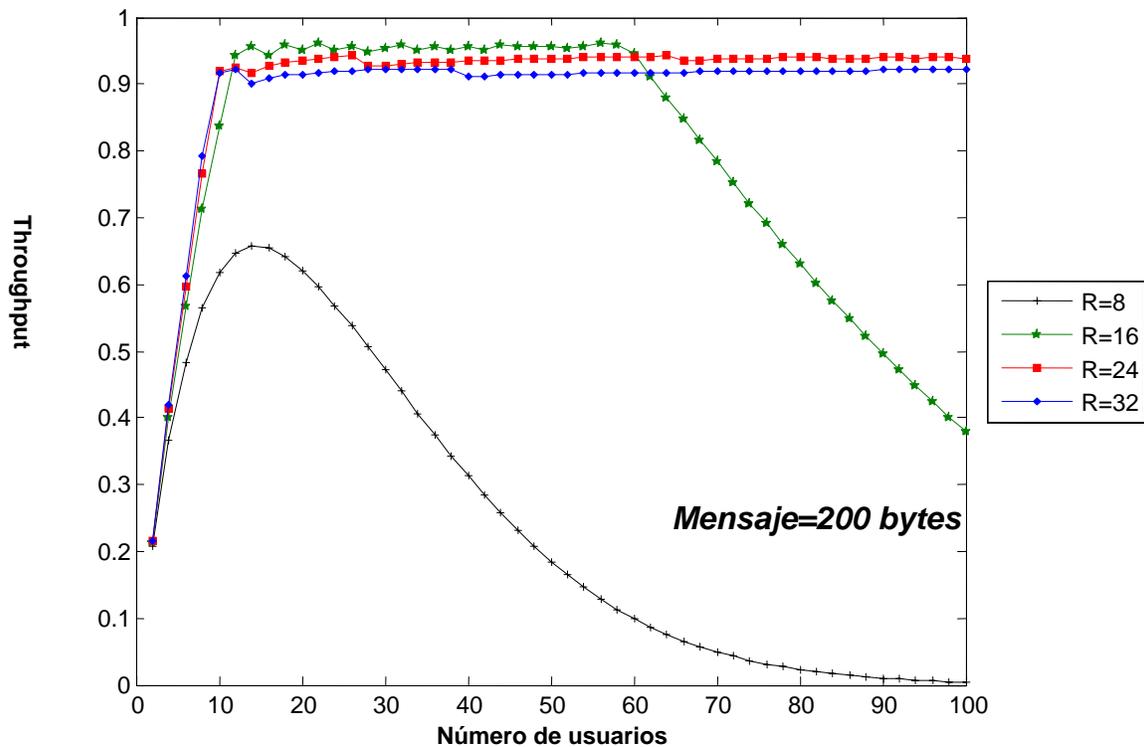


Figura 5-2. Throughput del sistema GPRS como función de U y parámetro R.

² Para consultar la función que calcula la longitud del mensaje, referirse al Apéndice A

Como puede observarse en la *Figura 5-2* el *throughput* obtenido es bastante alto y muy aproximado al teórico cuyos valores se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Throughput} = \frac{\text{No. Slots del Multiframe} - \text{No. Slots de Contención}}{\text{No. Slots del Multiframe}} \quad (15)$$

Considerando que los bloques del *multiframe* se usan en su totalidad para transmitir y que solo se excluyen aquellos *slots* utilizados en la contención.

No. Slots de Contención	Throughput Teórico
8	$T=(13*32-8)/13*32=0.9807$
16	$T=(13*32-16)/13*32=0.9615$
24	$T=(13*32-24)/13*32=0.9423$
32	$T=(13*32-32)/13*32=0.9230$

Tabla 5-2. Throughput teórico del sistema GPRS de multiframe-52

Como puede observarse conforme el número de usuarios es menor *el throughput* es más alto. Esto es razonable sin embargo no para todo el número de usuarios que se muestra en la figura, ya que a mayor número de usuarios el *throughput* teóricamente debe disminuir en forma similar al comportamiento que se presenta con $R=8$. Esto no sucede en la simulación ya que hemos considerado sesiones continuas y que ningún mensaje es encolado o deshechado del sistema; situación que no ocurre en una red real en operación, donde los paquetes llegan de forma aleatoria y pueden ser encolados para su transmisión.

2. Para el mismo caso de variación de parámetros, calculamos el *delay* del sistema el cual se determino de la siguiente forma:

$$\text{Delay} = E_z * 18.5ms$$

ya que la duración de un bloque RLC es de 18.5 ms.

Cabe mencionar que se toma como *Delay* para este caso todo el tiempo utilizado desde que el usuario intenta contender por el medio hasta que transmite el último bit de datos.

La **Figura 5-3** se muestra con fines ilustrativos sin embargo se realizo una figura adicional para poder mostrar con mayor detalle el comportamiento del retardo del sistema (Ver *Figura 5-4*)

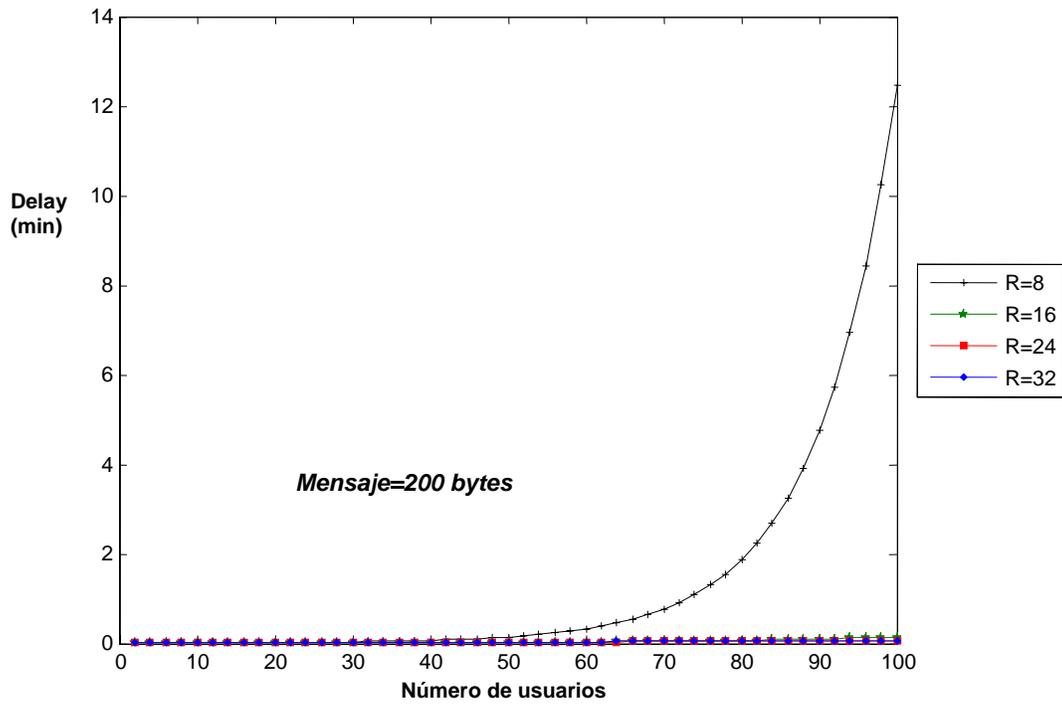


Figura 5-3 Delay del sistema GPRS como función de U y parámetro R

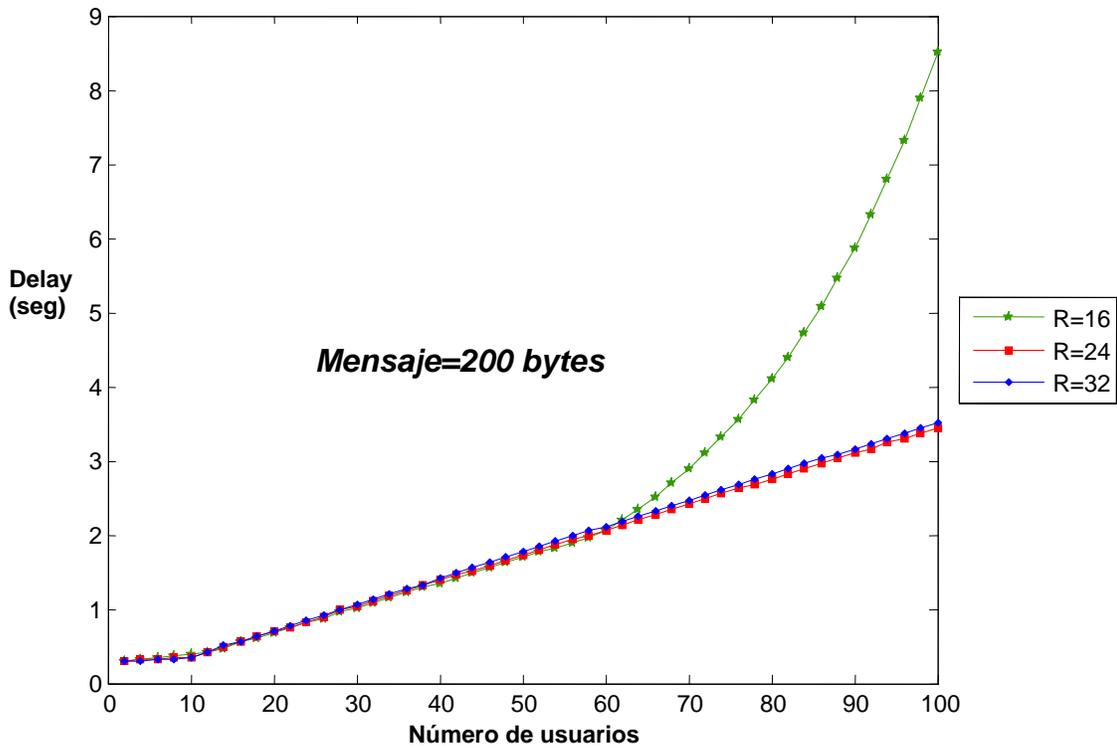


Figura 5-4. Detalle del delay del sistema GPRS como función de U y parámetro R

Como puede observarse en ambas figuras (*Figura 5-3* y *Figura 5-4*), el retardo de la red aumenta conforme aumenta el número de usuarios, esto es correcto y lógico ya que a mayor número de usuarios aumenta el tiempo de espera para contender y para transmitir de un usuario.

Ahora conforme aumenta el número de *slots* de contención disminuye el *delay* ya que el usuario tiene mayores posibilidades de contender exitosamente en un tiempo menor, sin embargo este cambio no es drástico ya que de igual forma al aumentar la contención disminuyen los bloques disponibles para transmisión de datos por lo que el usuario esperará un tiempo mayor para empezar a transmitir. Es por eso que para un número de *slots* mayor al promedio observamos que en realidad el retardo se vuelve más o menos estable. Donde es más notorio el comportamiento mencionado anteriormente es en $R=8$ ya que para pocos usuarios el tiempo es pequeño pero conforme aumenta el número de usuarios, el tiempo en que el usuario intenta al menos contender y lograr el éxito es mucho mayor ya que solo disponemos de 8 *slots* de contención para atender hasta 100 usuarios, por lo que deben pasar varios ciclos (o *multiframes*) para que los 100 usuarios puedan contender de forma exitosa y transmitir sus datos.

3. Como tercer caso, calculamos el *throughput* del sistema como función del número de *slots* de contención y como parámetro la longitud del mensaje, el cuál variamos para 4 posibles valores: 50, 100, 200 y 400 bytes. Fijamos el número de usuarios en 40 para ver como se desempeña la red en este caso.

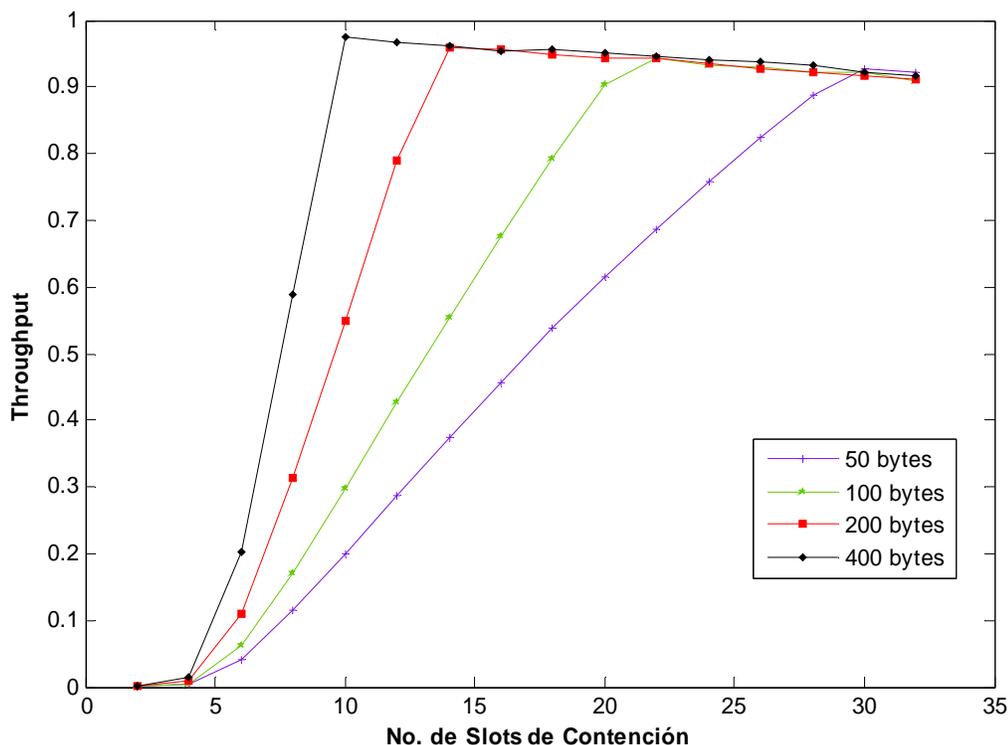


Figura 5-5. Throughput como función de R y como parámetro la longitud del mensaje. $U=40$ usuarios

Tal y como se muestra en la Figura 5-5, el *throughput* del sistema es mayor cuanto más grande es el tamaño del mensaje, esto se debe a que se aprovechan mejor los *slots* disponibles para la transmisión.

También se puede ver que mientras mayor es la longitud del mensaje y conforme aumentan los *slots* de contención el incremento en el *throughput* es mayor.

4. Otra simulación que se hizo respecto al *throughput* fue nuevamente con la longitud del mensaje como parámetro pero en este caso como función del número de usuarios.

En la *Figura 5-6* se muestran los resultados obtenidos de esta simulación. Como puede observarse, conforme aumenta el número de usuarios el *throughput* disminuye debido a que solo poseemos 8 *slots* de contención, esto es en todos los casos independientemente de la longitud del mensaje.

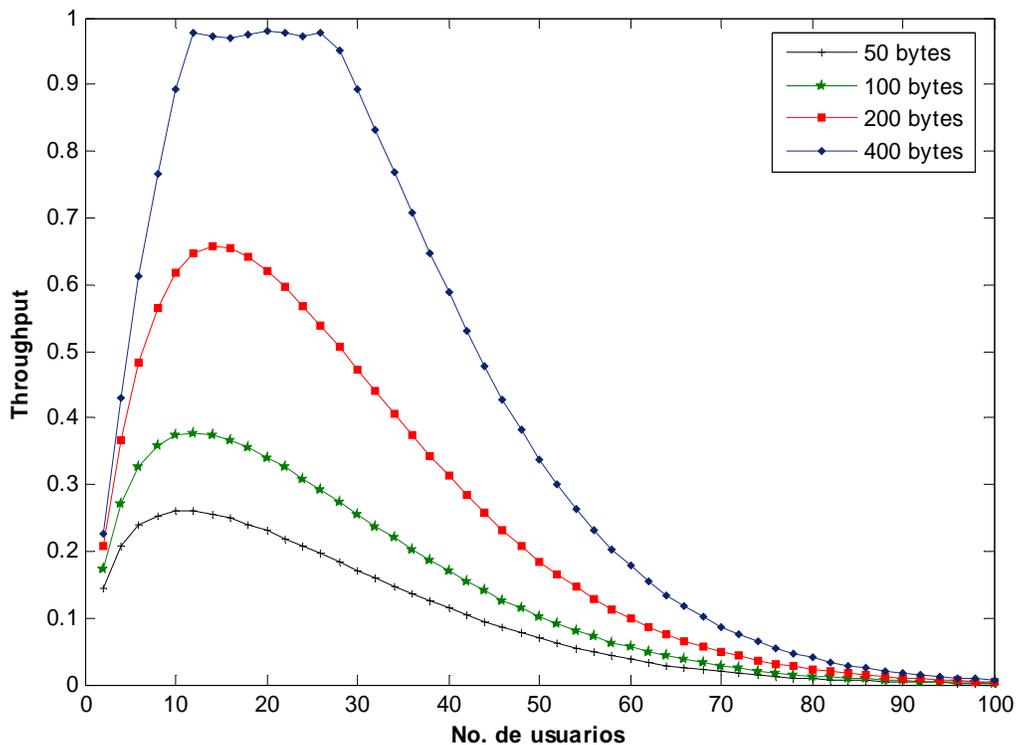


Figura 5-6. Throughput como una función del número de usuarios (U) y la longitud del mensaje como parámetro para R=8 slots de contención.

Ahora si vemos el impacto de la longitud del mensaje podemos observar que para cierto intervalo de usuarios entre mayor sea la longitud del mensaje es mayor el *throughput*, esto se debe a que en ese intervalo y para este número de *slots*, los *frames* disponibles son mejor utilizados, ya que hay una mayor cantidad de datos transmitidos y los usuarios son capaces de contender de forma exitosa para esa cantidad de *slots* de contención en un periodo razonable de tiempo.

5. Finalmente calculamos el *throughput* como una función del número de slots de contención pero esta vez teniendo como parámetro el número de usuarios para una longitud fija de datos de 200 bytes.

El resultado obtenido se grafica en la *Figura 5-7*. Se observa que el punto de máximo *throughput* es obtenido en distintos puntos dependiendo del número de usuarios conteniendo y el número de *slots* utilizados.

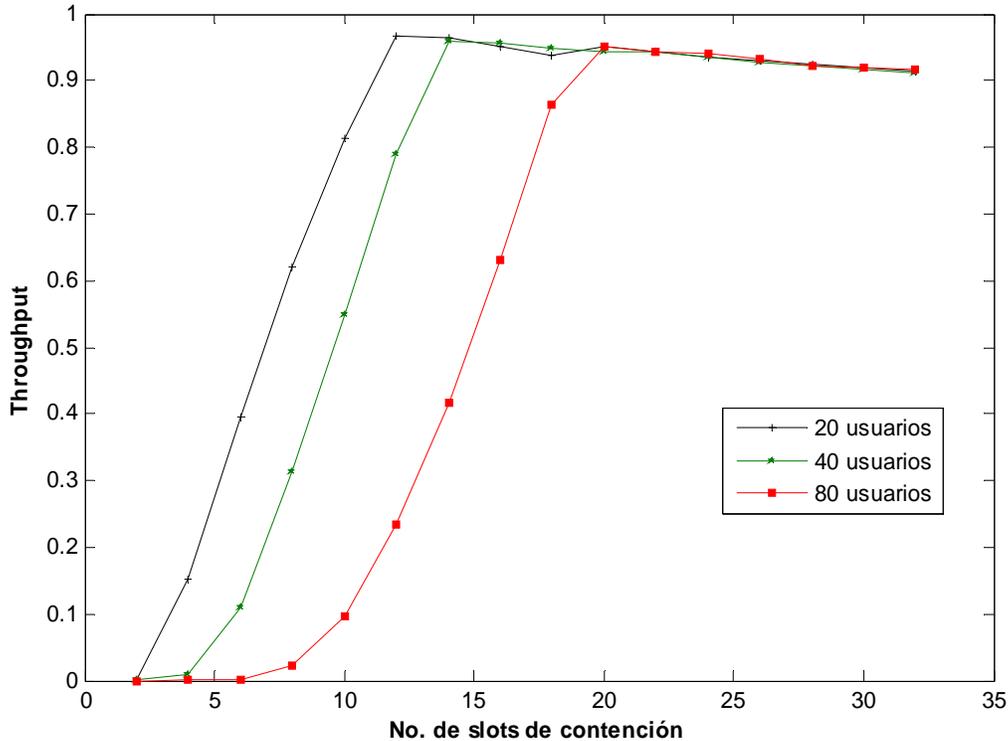


Figura 5-7 Throughput como función de *R* con longitud del mensaje=200 bytes y *U* como parámetro.

5.2 Análisis de la Eficiencia Volumétrica del Protocolo GPRS

La segunda parte de este estudio consiste en analizar la eficiencia volumétrica durante las diferentes capas del *stack* de protocolos GPRS. Para esto es importante entender como sucede el procedimiento de encapsulamiento para un paquete de datos que se desea transmitir en el sistema.

Los distintos protocolos del *stack* añaden un encabezado al paquete de datos del usuario, tal y como se ilustra en la *Figura 5-8*.

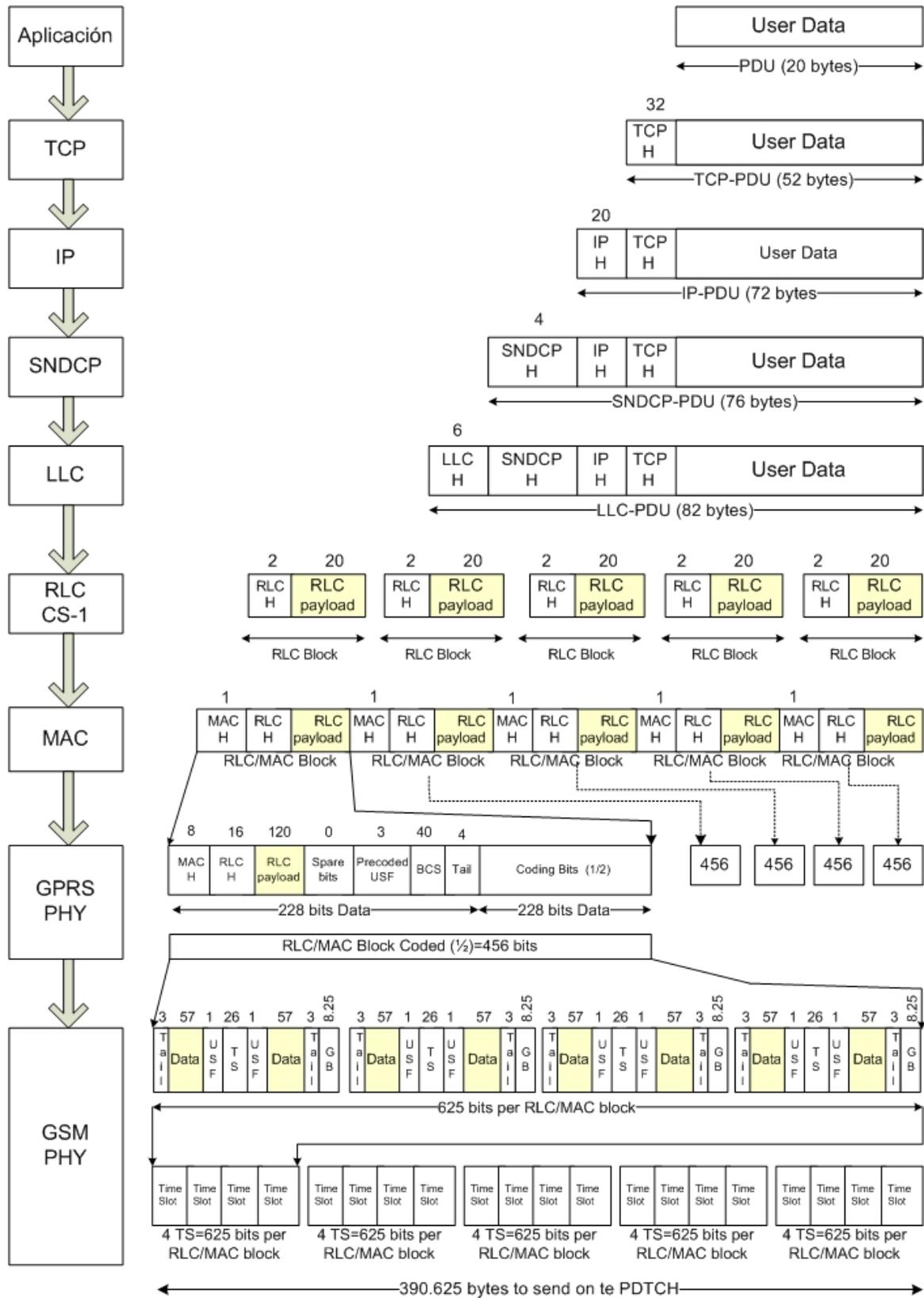


Figura 5-8. Encapsulamiento de datos en el stack de protocolos GPRS

Vemos que por cada capa del *stack* de protocolos se va añadiendo el encabezado correspondiente. Para la capa TCP se añade un encabezado de 32 bytes. En la capa IP se añaden 20 bytes. En la capa SNCP se agregan 4 bytes y en la LLC 6 bytes.

En la capa RLC/MAC se añaden 3 bytes de encabezado (2 de RLC y 1 de MAC) y se toma el tamaño del paquete según el esquema de codificación electo (para el caso ilustrado en la *Figura 5-8*, se eligió el esquema CS-1 cuyo tamaño de paquete es de 20 bytes).

En la capa GPRS PHY se lleva a cabo el proceso de codificación añadiendo los bits correspondientes de codificación. Una vez obtenido el paquete de 456 bits (proceso que se explicó con detalle en la sección 4.2.1.1) se ajusta dentro del canal físico GSM para ser enviado en bloques RLC de 4 *time slots* cada uno hasta completar la transmisión de todo el paquete de datos del usuario.

Como se ha explicado en cada capa se añaden bits ya sea por encabezado o codificación del protocolo, esto provoca que la eficiencia del sistema se vea afectada por lo que surge la necesidad de analizar la eficiencia volumétrica en cada una de las capas del *stack* de protocolos para ver como se va modificando el rendimiento del sistema GPRS.

Así, la eficiencia volumétrica se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Eficiencia en la capa } N(\eta): \frac{\text{Datos de usuario(PDU)}}{\text{Datos totales capa } N} \quad (16)$$

Se llevaron a cabo las siguientes simulaciones:

1. Eficiencia en las distintas capas del *stack* de protocolos GPRS para el esquema de codificación CS-1. De donde se obtuvo el resultado mostrado en la *Figura 5-9*
2. Eficiencia en las distintas capas del *stack* de protocolos GPRS para el esquema de codificación CS-2. De donde se obtuvo el resultado mostrado en la *Figura 5-10*
3. Eficiencia en las distintas capas del *stack* de protocolos GPRS para el esquema de codificación CS-3. De donde se obtuvo el resultado mostrado en la *Figura 5-11*.
4. Eficiencia en las distintas capas del *stack* de protocolos GPRS para el esquema de codificación CS-4. De donde se obtuvo el resultado mostrado en la *Figura 5-12*.

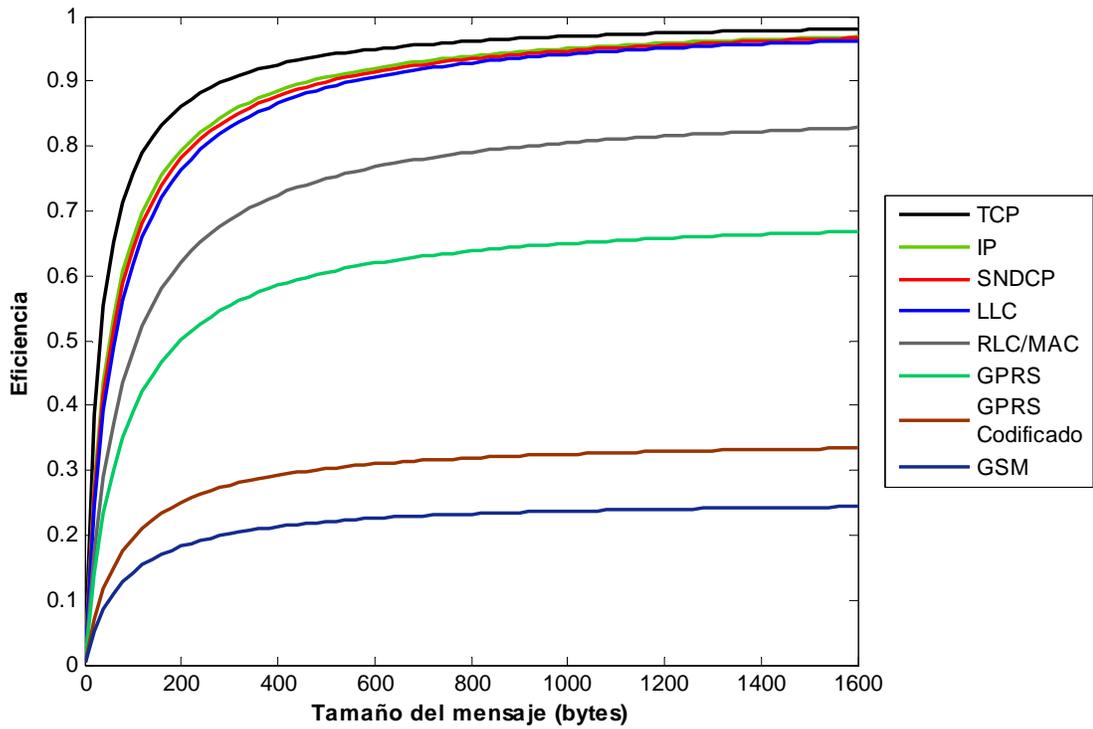


Figura 5-9. Eficiencia Volumétrica del Protocolo GPRS (CS-1)

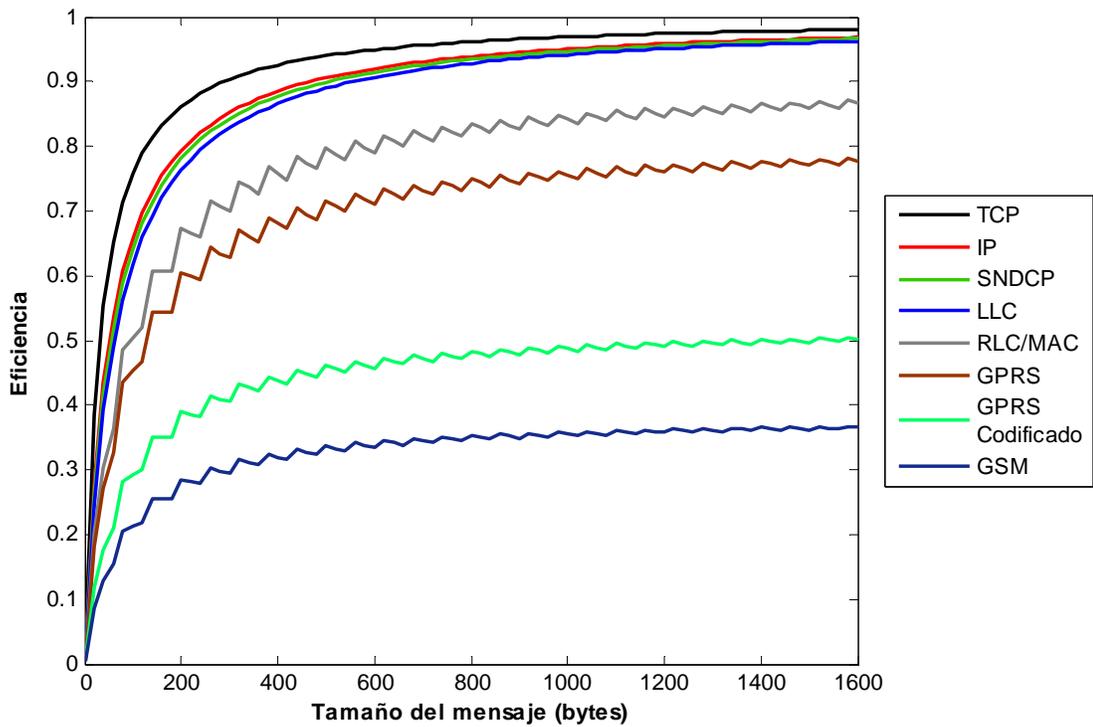


Figura 5-10. Eficiencia Volumétrica del Protocolo GPRS (CS-2)

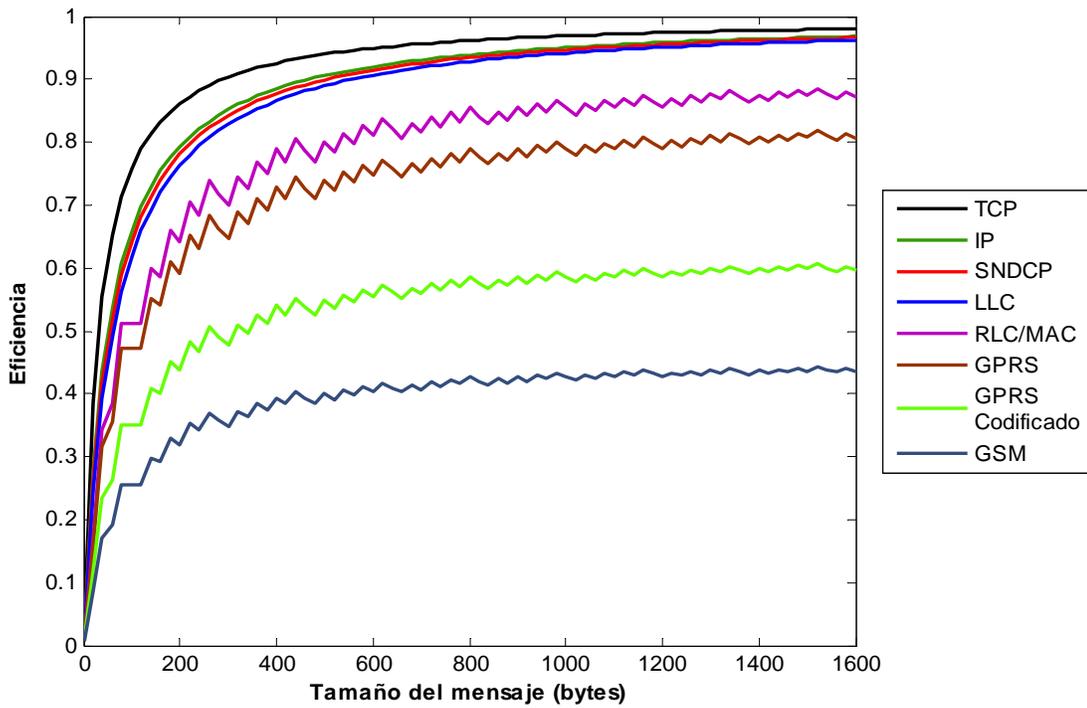


Figura 5-11. Eficiencia Volumétrica del Protocolo GPRS (CS-3)

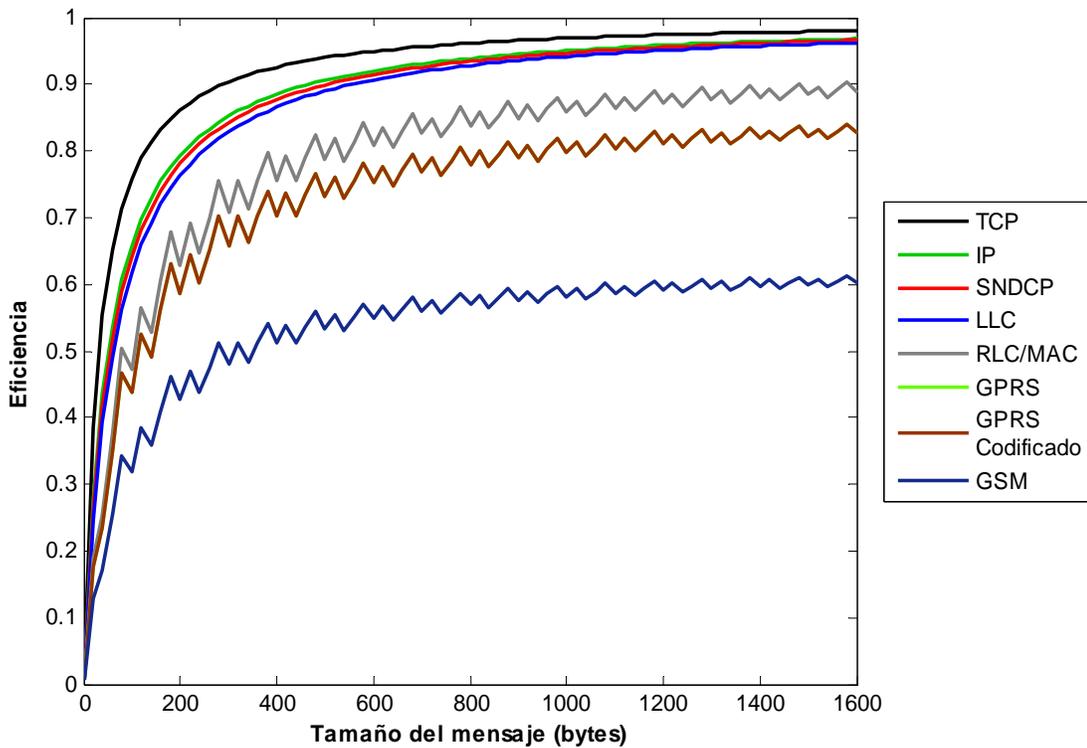


Figura 5-12. Eficiencia Volumétrica del Protocolo GPRS (CS-4)

Puede observarse en las distintas gráficas que conforme se añaden encabezados en cada capa y se efectúa el proceso de codificación correspondiente en la capa RLC/MAC(explicado para los distintos esquemas en el Capítulo 4. Sección 4.2.1.1), la eficiencia disminuye drásticamente. Y para paquetes de datos pequeños la eficiencia es aún menor pues los datos del usuario son un porcentaje menor de los datos que al final se transfieren en la capa física.

También puede notarse que la eficiencia es igual en todos los casos para las capas TCP, IP, SNDCP y LLC ya que el número de bits añadido es el mismo. El cambio significativo se observa a partir de la capa RLC/MAC donde el tamaño del paquete es distinto para cada esquema de codificación, así como la tasa con la que se codifica y el número de bits añadidos durante este proceso.

5. La última simulación consistió en hacer una comparación de la eficiencia en la última capa del *stack* para los distintos esquemas de codificación.

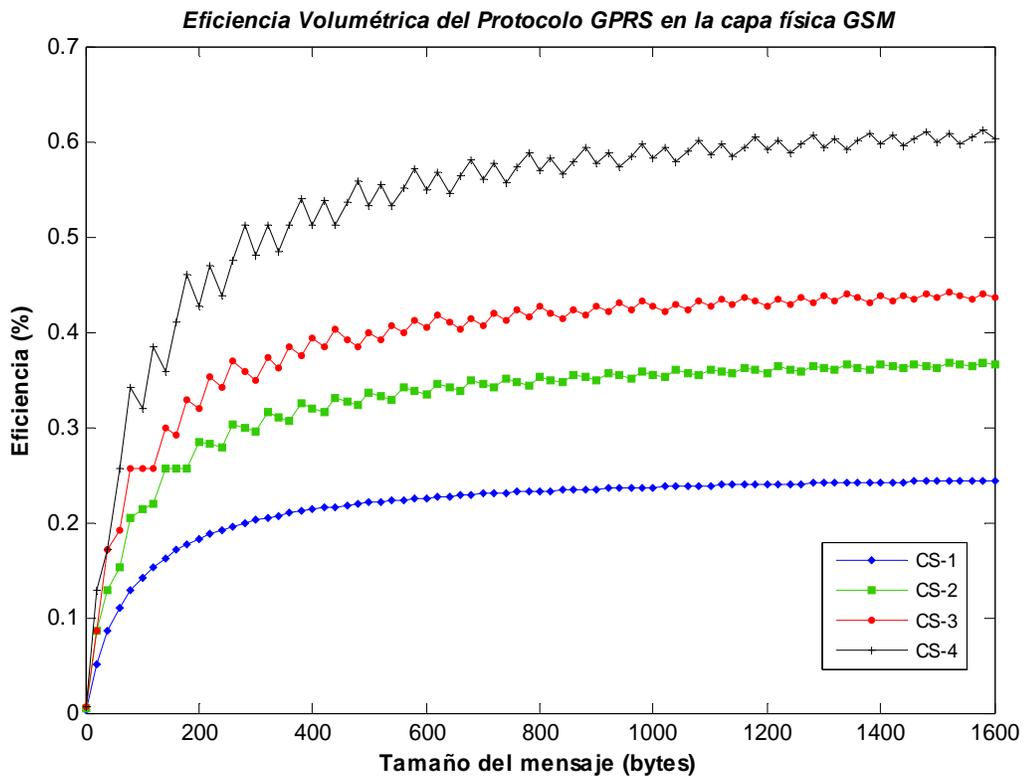


Figura 5-13. Eficiencia volumétrica del protocolo GPRS.

En el esquema CS-1 la eficiencia es muy baja por el tamaño del paquete a codificar en la capa RLC/MAC que es de solo 20 bytes. Los bits que se añaden por codificación, así como los de spare, tail y control para la transmisión en el canal físico, llegan a ser demasiados, con lo que se ve afectada la eficiencia final del protocolo GPRS.

En los esquemas CS-2 y CS-3 el tamaño del paquete es muy similar, 30 y 36 bytes respectivamente. Por tanto, la eficiencia para ambos esquemas es muy cercana, aunque obviamente es menor para el caso de CS-2.

Puede observarse que en el caso de CS-4 la eficiencia es considerablemente mayor que para el resto de los esquemas. Esto se debe:

- a. En primer lugar al tamaño del paquete LLC que toma para conformar el bloque RLC/MAC que es de 50 bytes, 2.5 veces que el utilizado en CS-1, lo cual reduce el número de bloques RLC necesarios y por consiguiente los bytes de encabezado añadidos.
- b. En segundo lugar a que en CS-4 no se hace codificación de los datos, lo cual también disminuye la cantidad de bits añadidos que no son de datos de usuario, sin embargo tiene la desventaja que la información viaja sin protección.

Finalmente puede notarse que conforme el tamaño del paquete, aumenta la eficiencia del protocolo, se vuelve estable ya que el encabezado, bits añadidos y codificación causan un efecto menor, debido a que el número de bytes de datos también es grande.

Cabe mencionar que los esquemas de codificación se eligen de acuerdo a las condiciones de uso, siendo CS-1 el esquema que añade mayor número de bits en la codificación (bits de protección). CS-1 se utiliza en ambientes donde la transmisión es complicada debido a interferencias o ambientes deteriorados. En cambio bajo CS-4, el operador de la red presupone que el ambiente de transmisión es óptimo, sin embargo necesita que la interferencia entre la estación móvil y la BST sea casi nula y el nivel de señal/ruido muy alto. A continuación se presentan gráficas correspondientes al throughput (en la capa LLC) y probabilidades de error contra el nivel de señal/ruido de cada uno de los esquemas de codificación. Vemos que el throughput para CS-4 sí es mayor pero a costa de una mayor cantidad de errores en la transmisión ya que la información va desprotegida.

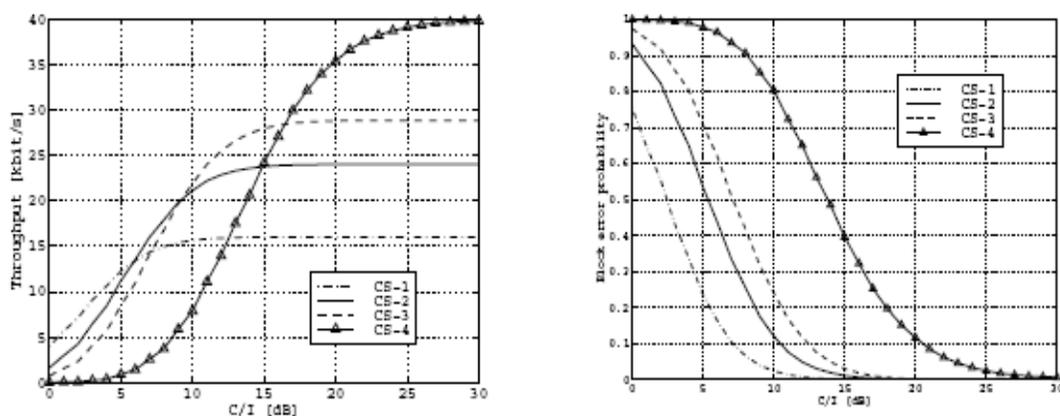


Figura 5-14. Throughput y Probabilidad de error en la capa LLC para los 4 esquemas de codificación.

5.3 Resumen del capítulo

En este capítulo se hizo un desarrollo del artículo de Chitre [39] explicando con mayor detalle al del artículo como es la derivación del procedimiento y mostrando los resultados obtenidos para distintos escenarios. Por otro lado también se hace un análisis breve de la eficiencia volumétrica del protocolo GPRS para cada uno de sus esquemas de codificación mencionando las comparaciones respectivas de eficiencia en cada una de las capas del stack de protocolos.

6 Conclusiones

De nuestro estudio podemos concluir lo siguiente:

El *throughput* del sistema puede ser determinado en base a distintos parámetros y lo deseable es encontrar una combinación donde el número de *slots* utilizado así como el número de usuarios a contender por un espacio en el canal de transmisión nos permitan obtener el desempeño deseado.

Se observa que el *throughput* puede ser sustentado en un intervalo pequeño de número de usuarios y puede ser incrementado, si aumentamos la longitud de nuestro mensaje o bien el número de *slots* de contención.

Sin embargo cabe mencionar que esto no es una garantía, ya que a pesar de que el número de *slots* de contención sea mayor y los usuarios tengan una mayor posibilidad de contender exitosamente por el medio, esto no asegura que una vez que hayan contendido, el sistema posea la capacidad suficiente para transmitir sus datos, aún más si la longitud del mensaje es muy grande, ya que esto aumentará el tiempo de espera y de transmisión de los datos lo que provocará un *delay* mayor de la red y por consiguiente un deceso en el *throughput* esperado. Otro factor que influye también en la disponibilidad del medio, es que al incrementar el número de *slots* de contención se disminuye el número de *slots* de transmisión y esto de igual forma produce un decremento en el *throughput* del sistema.

Es por esto que en la red se sugiere controlar lo que es fácil al proveedor como lo son el número máximo de usuarios que se añaden a la red y el número de *slots* de contención a utilizar los cuales puede variar de acuerdo a las necesidades que se presenten durante la transmisión, ya que en definitiva el tamaño del mensaje es algo que no podemos controlar si no solo podremos predecir probablemente en base a datos estadísticos de transmisión.

Por otro lado cabe mencionar que la reproducción de este estudio se logro hacer de manera exitosa, logrando obtener los resultados previos que se listan en el documento de referencia [39].

Así también es importante mencionar que se debe elegir un esquema de codificación correcto. Basándonos en la velocidad de transmisión que deseemos ofrecer al usuario, en el promedio de longitud del paquete de datos a transmitir y la seguridad que vamos a proporcionarle para obtener el mayor % de eficiencia posible.

El sistema que se tuvo bajo estudio, ha demostrado desde su definición y actual implantación, ser eficiente en cuanto al aprovechamiento de recursos de radio se refiere y ha satisfecho de cierta forma las necesidades de velocidad del usuario.

Sin embargo, debido a la rápida evolución de los sistemas actuales así como de las aplicaciones de las que hoy disponemos siguen surgiendo día a día una mayor necesidad de integración de servicios y mejores anchos de banda que ya son prometidos en la 3G.

Esta tesis se deja como base para futuros estudios y extrapolaciones de este método para sistemas celulares o de redes inalámbricas de nuevas generaciones cuyo funcionamiento sea similar o puede ser mapeado del de GPRS.

REFERENCIAS.

Libros

- [1] T. Wayne, “*Sistemas de Comunicación*”, Prentice Hall, 2000
- [2] R. L. Freeman. “*Telecommunication System Engineering*”, 3rd. Ed. Wiley Series in Telecommunications & Signal Processing, 2000, pp 883- 926
- [3] R. G. Winch, “*Telecommunication Transmission Systems*”, McGraw-Hill, 1993
- [4] W. S. Gibson, “*Celular Mobile Radiotelephones Systems*”, Prentice Hall, 1987
- [5] V. Garg, J. Wilkes, “*Wireless and Personal Communications Systems*”, Prentice Hall, 1996
- [6] T. S. Rappaport, “*Wireless Communications: Principles and Practice*”, 2nd. Ed. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series pp. 57-80
- [7] L. Harte, D. Bowler, “*Introduction to Mobile Telephone Systems*”, Wireless Systems, Althos Publishing, 2004
- [8] J. Eberspächer, H-J. Vögel, “*GSM Switching, Services and Protocols*”, 2nd. Ed. Wiley, 2000.
- [9] T. Jalonen, J. Romero, J. Melero, “*GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution Toward 3G/UMTS*”, Wiley, 2002
- [10] J. Korhonen, “*Introduction to 3G Mobile Communications*”, 2nd. Ed. Mobile Communications Series.
- [11] C. Smith, D. Collins, “*3G Wireless Networks*”, McGraw-Hill Telecom Profesional, 2003.
- [12] W. Mohr, W. Konhauser: “*Access Network Evolution Beyond Third Generation Mobile Communications*”, *IEEE Communications Magazine*, December 2000, pp 122-133.
- [13] H. Holma, A. Toskala, U. Lappalainen, “*WCDMA for UMTS: Radio Access For Third Generation Mobile Communications*”, 2nd. Ed., Wiley , 2003. pp 1-26

Artículos y Conferencias

- [14] J. Serrano, “Telefonía Celular”, Escuela Superior reingeniería , IPN.
- [15] J.J Murillo, “Sistemas de Radiocomunicaciones Móviles”, Curso de Radiación y

Radiocomunicación, Universidad de Sevilla.

[16] N. Spencer, "An overview of digital telephony standards" , IEEE, 1998

[17] G.M. Nieto, O.I. Manzano, "Telefonía Celular Digital", Vol II, Ingenierías, Universidad de Guanajuato.

[18] E. Martinez Martínez, "El ABC de las Telecomunicaciones", Revista RED, Diciembre, 2003

[19] E. Martinez Martínez, "La evolución de la telefonía móvil", Revista RED, Mayo , 2001

[20] L. V. Pastrana, "Tres generaciones en la Telefonía Celular", Revista RED, Agosto, 2002.

[21] Tutorial: "Curso de Telefonía Celular", Universidad de las Américas Puebla

[22] "Recopilación de temas sobre Sistemas de Radiotelefonía Celular", Curso de Radiocomunicaciones, FI, UNAM 2002.

[23] L. Walters, P.S.Kritzinger, "Redes Celulares: Pasado, Presente y Futuro", Revista RED.

[24] C. Hamling, "An overview of GSM Data Services", IEE Colloquium Roaming with Data, 1995

[25] D. G. Smith, "An introduction to GSM enhancements for operator specific services", IEEE, 1996

[26] M. Rahnema, "Overview of the GSM System and Protocol Architecture", IEEE Communications Magazine, April 1993.

[27] E. H. Schmid, M. Kährel, "GSM Operation and Maintenance", Electrical Communication, 2Q 1993.

[28] G. Neonakis, R. Tafazolli, "On the Relaying Capability of Next-Generation GSM Cellular Networks", IEEE Personal Communications, February, 2001.

[29] F. Schreiber, M. Falleni, "Analysis of Data Transmission Performance over a GSM Cellular Network", IEEE 1997.

[30] C.M.Noblet, R.H. Owen, C. Saraiva, "Assessing the effects of GSM cell location re-use for UMTS Network", -G Mobile Communication Technologies, March 2001.

[31] A. Furuskär, " GSM/EDGE Overview", Ericsson

[32] H. Olofsson, A. Furuskär, "Aspects of Introducing EDGE in Existing GSM Networks", IEEE, 1998

- [33] C.Bettstetter, H-J Vögel, J. Eberspächer, "GSM Phase 2+ General Packet Radio Service GPRS: Architecture, Protocols and Air Interface", IEEE Communications Surveys, Vol 2, No. 3, 3Q 1999, pp 2-14.
- [34] E. Molina, "GPRS", Curso de Sistemas Móviles, Universidad de Venezuela
- [35] "GPRS Technology Overview" White Paper, Dell, Feb 2002.
- [36] H. Kari, "GPRS Overview" , Helsinki University of Technology
- [37] J.Mellberg, "GPRS Overview: Applications Over GPRS", Ericsson.
- [38] "Protocol Overhead in GPRS" White Paper, Ericsson, 2002.
- [39] V.A. Chitre, H.N. Daigle, "IP Traffic over GPRS- An Internet Service Oriented Analysis", IEEE 1999.
- [40] D. Zelmer, "GPRS, EDGE, & GERAN: Improving the performance of GSM & TDMA Wireless by Packet Capabilities" Supercomm 2001, Atlanta.
- [41] "GPRS Measurements in TEMS Products", White Paper, Ericsson, 2002.
- [42] "Notes on GPRS Performance Issues", White Paper, Ericsson 2002.
- [43] S. Mayer, "Impact of GPRS on the signaling of a GSM based network" , IND, University of Stuttgart
- [44] M. Meyer; "*TCP Performance over GPRS*", Ericsson
- [45] X. Chenm D.J. Goodman, "Theoretical Analysis of GPRS Throughput and Delay", IEEE International Conference on Communications, June 2004.
- [46] T. S. Rappaport, "Future Trends Of Mobile and Personal Communications", IEEE MTT-S IMOC'95 Proceedings.
- [47] J-L. Hurel, C. Lerouge, C. Evci, L. Gui; "*Mobile Network Evolution: From 3G Onwards*"; Alcatel Telecommunications Review , 2003, pp 1-10.
- [48] V. Garg et all, "Third Generation (3G) Mobile Communications Systems", Bell Labs, IEEE 1999.
- [49] K.W. Richardson, "UMTS overview", Electronics & Communication Engineering Journal, June 2000.
- [50] "UMTS Protocols and Protocol Testing", Web Forum Tutorials, The International Engineering Consorsrtium.
- [51] Grupo de Comunicaciones de Radio, "WLAN: Wireless Local Area Networks", Universidad Politecnica de Cataluña.

- [51] A.Salkintzis et all, "WLAN-GPRS Integration for next generation mobile data networks", IEEE Wireless Communications, October, 2002.
- [52] J. S. García, "Comunicaciones Inalámbricas de 4ta. Generación", CICESE, 2001.
- [53] "Luz Verde al Estándar Wi-Fi Más Rápido", Revista Comunicaciones World
- [54] "HiperLAN2 Una Introducción al estándar de red inalámbrica europeo" Curso de Doctorado Nuevas Tecnologías para las Comunicaciones de la Universidad Autónoma de Madrid, 2002.
- [55] J. Khan, "Introduction to 3G/4G Wireless Network Architectures" , IEEE, 2001
- [56] C. García, "IEEE 802.16: WiMax El futuro de las redes inalámbricas " , Revista Computer
- [57] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; General Packet Radio Service (GPRS); Service description, Stage 1 (Release 5)
- [58] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and Systems Aspects; Network architecture (Release 5)
- [59] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; General Packet Radio Service (GPRS); Service description; Stage 2(Release 5)
- [60] IEEE Standard 802.16, LAN/MAN Committee, IEEE Computer Society & IEEE Microwave and Techniques Society.

Páginas Web y Organizaciones

- [61] European Telecommunications Standards Institute (ETSI): www.etsi.org
- [62] Institute of Electrical and Electronic Engineering (IEEE): www.ieee.org
- [63] Unión Internacional de Telecomunicaciones: www.itu.int
- [64] www.gsmworld.com
- [65] www.gsmdata.com
- [66] www.cdg.org
- [67] www.3gpp2.org
- [68] www.hiperlan2.com
- [69] www.wi-lan.com

- [70] <http://es.gsmbox.com/gprs/>
- [71] www.webmovilgsm.com
- [72] www.wirelessman.org
- [73] www.mobiledata.com
- [74] www.wapforum.com
- [75] www.ieee802.org/11/
- [76] www.iusacell.com.mx
- [77] www.acm.org
- [78] www.alcatel.com.mx
- [79] www.auladatos.movistar.com
- [80] www.vodafone.es/Vodafone/Campus/Campus/0,1463,2237,00.html
- [81] www.mobilelifestreams.com
- [82] www.arcelect.com/2G-3G_Cellular_Wireless.htm
- [83] www.monografias.com
- [84] www.htmlweb.net/redes
- [85] www.it.uc3m.es/~isoto/assignaturas/pcsm/#4
- [86] www.tid.es/presencia/publicaciones
- [87] www.uv.es/~montanan/redes/trabajos/GPRS.ppt
- [88] www.uv.es/~montanan/redes/trabajos/GPRS.doc
- [89] http://wwwdi.ujaen.es/~mcdiaz/docencia/cur02_03/infsoc/Resumen_telefonia_movil.doc
- [90] <http://uvirtual.uninorte.edu.co/catalogoweb/ingenierias/EspSistemasTelecom/disredesinalambricas.htm>
- [91] <http://www.listin.com.do>
- [92] <http://www.idg.es/comunicaciones>

Acrónimos

1G	Primera generación de telefonía celular
2G	Segunda generación de telefonía celular
2.5G	Generación de transición entre la 2G y 3G de telefonía celular
3G	Tercera generación de telefonía celular
3GPP	Third- generation Partnership Program
3GPP2	Third Generation Partnership Project 2
ACC	Analogic Control Channel
ACK	Acknowledge
AGCH	Access Grant Channel
AMPS	Advanced Mobile Phone System
ANSI	Instituto Americano de Estándares
ARIB	Asociación de Industrias de la Radio y Radiodifusión
ARQ	Automatic Repeat Request
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AT&T	American Telephone & Telegraph Company
AUC	Authentication Center
BCCH	Broadcast Control Channel
BCS	Block Check Sequence
BEC	Backward Error Correction
BRAN	Broadband Radio Access Networks
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Subsystem
BST	Base Station Transceiver
BTS	Base Transceiver Station
BVC	Backward Voice Channel
CB	City Band- Banda Ciudadana
CCCH	Common Control Channel
CSD	Circuit Switched Data
CCS	Abreviatura del tráfico expresado en unidades de llamadas (UC) o su término sinónimo (HCS)
CDG	CDMA DEvelopment Group
CDMA	Code Division Multiple Access
CNET	Sistema Celular de 1ª. Generación Alemán
CL	Convergence Layer
CSPDN	Circuit-Switched Public Data Network
DAMPS	Digital Advanced Mobile Phone System
DB	Decibel
DCC	Digital Control Channel
DLC	Data Link Control Layer
DS-CDMA	Direct Sequence Code Division Multiple Access
DSSS	Espectro Esparcido de Secuencia Directa
DTC	Digital Traffic Channel
EBHC	Equated Busy Hour Call
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution
EIR	Equipment Identity Register
ETACS	Extended Total Access Communications Systems
ETDMA	Extended TDMA
ETSI	Instituto Europeo de Telecomunicaciones
FACCH	Fast-Associated Control Channel

FCCH	Frequency Control Channel
FDD	Frequency Division Duplexing
FDM	Frequency Division Multiplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FCC	Federal Communications Comision
FEC	Forward Error Correction
FLC	Forward Link Channel
FM	Frequency Modulation
FSK	Frequency Shift Keying
FHSS	Espectro Esparcido por Saltos en Frecuencia
FVC	Forward Voice Channel
GGSN	Gateway GSN
GGSN-D	GGSN Destination
GGSN-S	GGSN Source
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GOS	Grade of Service
GPS	Global Position System
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
GSN	GPRS Support Node
GTP	GPRS Tunnel Protocol
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
IC	Identification Card
ID	Identifier
IDEN	Integrated Dispatch Enhanced Network
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineering
IETF	Internet Engineering Task Force
IMEI	International Mobile Equipment Identifier
IMSI	International Mobile Station Identifier
IMTS	Improved Mobile Telephone System
IN	Intelligent Network
ISDN	Integrated Services Digital Network
ITT	International Telephone and Telegraph
ITU	Internacional Telegraphic Union- Unión Telegráfica Internacional- Unión Internacional de Telecomunicaciones
ITU-R	Internacional Telecommunication Union Radio Sector
JTACS	Japanese Total Access Communications Systems
Kc	Llave de cifrado
LAN	Local Area Network
LAPD	Link Access Procedure D
LAPDm	Protocolo de Acceso de Enlace sobre el Canal Dm
LLC	Logical Link Control
MMAC-PC	High Speed Wireleds Access Systems Group
MATS-E	Sistema Celular de 1a. Generación Francés
MC-CDMA	Multi-Carrier CDMA
MCS	Japanese Mobile Cellular System
MDISDN	Mobile Station ISDN
MIN	Mobile Identification Number
MMS	Multimedia Message Service
MS	Mobile Station
MSC	Mobile Switching Center

MTS	Mobile Telephone Service
NACK	Negative ACK
NADC	North American Digital Cellular
NAMPS	Narrow Advanced Mobile Phone System
N-PDUs	Network Packet Data Units
NTACS	Narrow Total Access Communications Systems
NTT	Nippon Telegraph & Telephone Corp.
NMT	Nordic Mobile Telephony
OFDM	Ortogonal Frequency Division Multiplexing
PA	Power Amplifier
PACCH	Packet Associated Control Channel
PAGCH	Packet Access Grant Channel
PBCCH	Packet Broadcast Control Channel
PC	Power Control
PCCCHs	Packet Common Control Channels
PCH	Paging Channel
PCN	Personal Communications Network
PCR	Packet Channel Request
PCS	Personal Communications System/Services
PDA	Personal Digital Assistant
PDC	Personal Digital Communications
PDCH	Packet Data Channel
PDC-P	PDC Mobile Packet Data Communication System
PDUs	Protocol Data Units
PDTCH	Packet Data Transfer Channel
PHY	Physical Layer
PIA	Packet Immediate Assignment
PLL	Physical Link Layer
PLMN	Public Land Mobile Network- Red Pública Móvil Terrestre
PM	Phase Modulation
PMP	Point to Multipoint Protocol
PN	Pseudo-random noise
PNCH	Packet Notification Channel
PPCH	Packet Paging Channel
PPP	Point to Point Protocol
PPRes	Packet Paging Response
PPReq	Packet Paging Request
PRA	Packet Request Assignment
PRACH	Packet Random Access Channel
PRR	Packet Resource Request
PSPDN	Packet-Switched Public Data Network
PSM	Phase Shift Modulation
PSK	Phase Shift Keying
PSTN	Public Switched Telephone Network
PTP	Point to Point
PTM	Point to Multipoint
PTM-M	Point to Multipoint Multicast
QoS	Quality of Service
RACH	Random Access Channel
RAN	Radio Access Network

RAND	Random Number
RCC	Reverse Control Channel
RLC	Reverse Link Channel
RLC/MAC	Radio Link Control/Medium Access Control
RF	Radio Frequency
RFL	RF Layer
RTT	Radio Transmission Technology
RUM	Red Universal Multimedia
SACCH	Slow-Associated Control Channel
SAT	Supervisory Audio Tone
SCH	Synchronization Channel
SCPC	Single Channel Per Carrier
SDCCH	Standalone Dedicated Control Channel
SGSN	Service GSN
SGSN-D	SGSN Destination
SGSN-S	SGSN Source
SIS	Subscriber Identity Security
SMS	Short Message Service
SMSC	Short Message Service Center
SNDCP	Subnetwork Dependent Convergente Protocol
SRES	Source Response
ST	Signaling Tone
S/N	Relación señal a ruido
TACS	Total Access Communications Systems
TCHs	Traffic Channels
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TDD-CDMA	Time Division Duplexing CDMA
TIA	Telecommunications Industry Association
TDD	Time Division Duplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TLLI	Temporal Logical Link Identity
TFI	Temporary Frame Identity
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telephone Service
UPR	User Performance Requirements
USF	Uplink State Flag
UT	Unidad de Tráfico
UTRA	Universal Terrestrial Radio Access
UWCC	Universal Wireless Communication Consortium
HLR	Home Location Register
VLR	Visitor Location Register
VPN	Virtual Private Network
WAP	Wireless Access Protocol
WARC	Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones
WCDMA	Wideband CDMA
Wi-Fi	Estándar de redes WLAN 802.11
WiMax	Estándar de redes 802.16
WMAN	Wireless Metropolitan Area Networks
WML	Lenguaje de etiquetas para WAP
WRC	Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones
WTAI	Wireless Telephony Application Interface

APÉNDICE A

Programa en Matlab 7.0 para el desarrollo del modelo matemático.

- *Simulación.m*

```

clear all

%Declaración de variables

for R=8:8:32          %Parámetro de slots de contencion.
k=0;
    for U=2:2:100     %Parámetro de número de usuarios.
        c=1;          %Condición a evaluar
        Pc=0.3        %Probabilidad de contención inicial
        Ew=1 ;        %Periodo de espera
        Ex=14 ;       %Longitud del mensaje para 200 bytes
        Pt1=0;        %Probabilidades temporales para sumatoria
        Pt2=0;
        Pt3=0;
        F=13;         %Número de bloques en el multiframe
        Pcn=0;        %Valor inicial
        cp=8;         %Capacidad paralela

%*****
%Calculo de la Probabilidad de Captura
%*****

    if U >= 6
        Pcap=[1 .67 0.48 .40 .35];
        for i=6:U
            Pcap(i)=0;
        end
    else
        Pcap=[1 .67 0.48 .40 .35];
    end

%*****
%Convergencia de Ew
%*****

while (c==1)
    dif=1;          %Forzamos a que la condición sea verdadera para
                   %cada Pc nuevo calculado al variar Ew

    %-----
    %Convergencia de Pc
    %-----

    while dif > 10e-10
        Ps=0;      %Hacemos que Ps=0 al iniciar el calculo

```

```

Ec=1+((1-Pc)*F/(Pc));           %de Pc
Ez=Ec+Ew+Ex;                    %Calculo de Ec
Ebz=Ez/F;                       %Calculo de Ez
Pu=F/(Ez*Pc);                   %Calculo de Pu

%Calculo de Pc a comparar
for u=1:U
    Pt2=0;
    for n=1:u
        Pt1=Pcap(n)*dbinomial(u,n,1/R);
        %Producto de P{S/n=n}P{n=n/u=u}=Pcaptura*Pbinomial(Parámetro 1/R)

        Pt2=Pt2+Pt1;             %Sumatoria desde n=0 hasta u de los productos
    end
    Psu(u)=Pt2;                  %Calculo de P{S/u=u} la cual nombramos Psu
    Puu(u)=dbinomial(U,u,Pu);    %Calculo de P{u=u} la cual nombramos Puu
    % (Parámetro Pu)
    Pt3=Psu(u)*Puu(u);          %Hacemos el producto P{S/u=u}P{u=u} para una
    % u dada
    Ps=Pt3+Ps;                  %Hacemos la sumatoria desde u=0 hasta U de
    % los productos.

end
Pcn=R*Ps/(U*Pu);                %Obtenemos la nueva Pc=R*Ps/U*Pu
dif=abs(Pc-Pcn);                %Comparamos entre la Pc inicial y la obtenida
% para ver si converge
Pc=Pcn;                          %Asignamos el nuevo valor a Pc
end

%-----

Ec=1+((1-Pc)*F/(Pc));           %Con los últimos valores calculamos
Ez=Ec+Ew+Ex;                    %nuevamente los valores para Ez, Ec y Ebz
Ebz=Ez/F;

%*****
%Calculo de los bloques disponibles
%*****

Bd=(Ebz*R/32);                  %Proporción de bloques de contención utilizados
Ed=(Ez-Bd)*cp;                  %Número de bloques disponibles totales
Edu=Ed/U;                       %Número de bloques disponibles por usuario
% para transmisión

if Edu<=Ex                       %si los bloques disponibles son menores que los
    % requeridos
    Us=Edu;                      %el usershare será igual al número de bloques
    % disponibles por usuario
else
    Us=Ex;                       %si es mayor será igual al número de bloques
    % requerido
end

```

```

if (Us<Ex)
    if ((Ex-Us)>=1)
        Ew=Ew+Ex-Us;           %Si el Usershare es menor que lo requerido
                                aumentar Ew con la diferencia entre lo disponible
                                y lo requerido si esta es mayor queuno
    else
        Ew=Ew+1;             %si la diferencia es menor que uno aumentar el
                                Ew en 1
    end

else c=0;                    %Si el Usershare es igual a lo requerido no
                                aumentar Ew
                                %Terminar la iteración
end
end
k=k+1;

switch R
case 8
    Pcfa(k)=Pc;
    Ecfa(k)=Ec;
    Ezfa(k)=Ez;
    troughputa(k)=(U*Ex)/(Ez*cp); %Calculo del throughput
    delaya(k)=Ez*18.5e-3;        %Calculo del delay en segundos
case 16
    Pcfb(k)=Pc;
    Ecfb(k)=Ec;
    Ezfb(k)=Ez;
    troughputb(k)=(U*Ex)/(Ez*cp);
    delayb(k)=Ez*18.5e-3;
case 24
    Pcfc(k)=Pc;
    Ecfc(k)=Ec;
    Ezfc(k)=Ez;
    troughputc(k)=(U*Ex)/(Ez*cp);
    delaybc(k)=Ez*18.5e-3;
otherwise
    Pcfd(k)=Pc;
    Ecfd(k)=Ec;
    Ezfd(k)=Ez;
    troughputd(k)=(U*Ex)/(Ez*cp);
    delaybc(k)=Ez*18.5e-3;
end
end                               %del for
end                               %del for para R

%*****
%Grafica del delay
%*****

plot(U,ta,'+-',U,tb,'p-',U,tc,'x-',U,td,'*-')
xlabel('Número de usuarios')
ylabel('Delay (seg)')
title('Delay del sistema GPRS en función de U y R como parámetro')

```

```

%*****
%Grafica del throughput
%*****

plot(U,troughputa,'+-',U,troughputb,'p-',U,troughputc,'s-',U,troughputd,'d-')
xlabel('Número de usuarios')
title('Throughput como función de U y parámetro R')
ylabel('Throughput')

%*****
Función que calcula el tamaño del mensaje en
funcion de bloques RLC
%*****

function msg=longitudmensaje(datos)

hIP=20;                %Encabezado IP
hLLC=40;               %Encabezado LLC
TDPU=datos;           %Datos del mensaje original en bytes
fSNDCP=TDPU+hIP;      %Frame SNDCP
dLLCmax=1600;         %Datos LLC maximos por frame
fLLCmax=dLLCmax+hLLC; %Tamaño max del frame LLC
fLLC=fSNDCP+hLLC;     %Frame LLC
bRLCt=fLLC/20;        %Bloques RLC totales
bRLCa=bRLCt/12;       %Adecuandolo al multiframe calculamos cuantos
                        %bloques de contención estamos utilizando
bRLC=bRLCt+bRLCa     %Añadimos los bloques de contención previamente
                        %calculado ya que estos no se habían tomando en
                        %cuenta.

msg=bRLC
end

%*****
%Función que calcula la distribución binomial con parámetro p
%*****

function db=dbinomial(u,n,p)
    q=1-p;
    factu=factorial(u);
    factn=factorial(n);
    dif=u-n;
    factdif=factorial(dif);
    factor=factu/(factn*factdif);
    db=factor*(p^n)*(q^dif);
end

```

Resultados arrojados por el programa en Matlab

Todos los resultados que a continuación se listan fueron obtenidos del algoritmo de Matlab anteriormente mostrado. En algunos casos se requirió fijar algunos datos como los slots de contención, el número de usuarios y la longitud del mensaje de acuerdo al modelo que se deseaba simular.

A.1 Throughput y Delay como función del número de usuarios y con parámetro R.

No. de slots de contención (R)	No. de usuarios (U)	Throughput	Delay (seg)
8	2	0.20643	0.31366
8	4	0.36579	0.35403
8	6	0.48324	0.40197
8	8	0.56487	0.45851
8	10	0.61703	0.52469
8	12	0.6458	0.60158
8	14	0.65658	0.69032
8	16	0.6539	0.79217
8	18	0.64132	0.90867
8	20	0.62162	1.0416
8	22	0.59684	1.1934
8	24	0.56855	1.3666
8	26	0.53789	1.5649
8	28	0.50575	1.7924
8	30	0.47283	2.0541
8	32	0.43967	2.3563
8	34	0.40674	2.7062
8	36	0.37442	3.1128
8	38	0.34302	3.5865
8	40	0.3128	4.1401
8	42	0.28396	4.7885
8	44	0.25667	5.55
8	46	0.23103	6.4462
8	48	0.20711	7.5034
8	50	0.18494	8.7527
8	52	0.16453	10.232
8	54	0.14584	11.987
8	56	0.12883	14.073
8	58	0.11342	16.555
8	60	0.099535	19.516
8	62	0.087079	23.051
8	64	0.075955	27.279
8	66	0.066063	32.344
8	68	0.0573	38.421
8	70	0.049567	45.721
8	72	0.042768	54.503
8	74	0.036811	65.083
8	76	0.031608	77.845
8	78	0.027077	93.26
8	80	0.023145	111.9
8	82	0.019741	134.48
8	84	0.016803	161.85
8	86	0.014273	195.07
8	88	0.012101	235.44
8	90	0.01024	284.56

Análisis del desempeño de las redes celulares GSM-GPRS

8	92	0.0086491	344.37
8	94	0.0072928	417.3
8	96	0.0061386	506.3
8	98	0.0051586	615.04
8	100	0.0043281	748.02
16	2	0.21267	0.30446
16	4	0.40151	0.32253
16	6	0.56762	0.34222
16	8	0.71222	0.36365
16	10	0.83667	0.38695
16	12	0.94243	0.41223
16	14	0.95682	0.4737
16	16	0.94365	0.54893
16	18	0.95991	0.60709
16	20	0.95154	0.68048
16	22	0.96032	0.74168
16	24	0.95075	0.81725
16	26	0.95706	0.87952
16	28	0.94794	0.95629
16	30	0.95349	1.0186
16	32	0.95863	1.0807
16	34	0.95112	1.1573
16	36	0.95645	1.2186
16	38	0.95049	1.2943
16	40	0.95643	1.354
16	42	0.95188	1.4285
16	44	0.95866	1.4859
16	46	0.95648	1.557
16	48	0.95589	1.6257
16	50	0.95741	1.6908
16	52	0.95349	1.7656
16	54	0.95505	1.8305
16	56	0.96065	1.8873
16	58	0.95794	1.9602
16	60	0.94466	2.0563
16	62	0.91232	2.2002
16	64	0.87996	2.3546
16	66	0.8477	2.5206
16	68	0.81564	2.6991
16	70	0.78385	2.8912
16	72	0.75244	3.0979
16	74	0.72146	3.3207
16	76	0.69099	3.5608
16	78	0.66108	3.8199
16	80	0.63179	4.0995
16	82	0.60316	4.4014
16	84	0.57523	4.7277
16	86	0.54804	5.0804
16	88	0.52161	5.4619
16	90	0.49597	5.8748
16	92	0.47114	6.3219
16	94	0.44713	6.8063
16	96	0.42394	7.3312
16	98	0.4016	7.9003
16	100	0.38009	8.5178
24	2	0.21471	0.30156
24	4	0.4135	0.31318

24	6	0.5968	0.32549
24	8	0.76511	0.33851
24	10	0.91899	0.35229
24	12	0.92566	0.4197
24	14	0.91677	0.4944
24	16	0.92693	0.55883
24	18	0.93234	0.62504
24	20	0.9358	0.69192
24	22	0.93833	0.75906
24	24	0.94034	0.8263
24	26	0.94203	0.89355
24	28	0.92696	0.97793
24	30	0.92845	1.0461
24	32	0.92991	1.1141
24	34	0.93131	1.1819
24	36	0.93266	1.2496
24	38	0.93363	1.3177
24	40	0.93443	1.3859
24	42	0.93526	1.4539
24	44	0.93612	1.5217
24	46	0.93695	1.5895
24	48	0.93748	1.6576
24	50	0.93806	1.7256
24	52	0.93869	1.7935
24	54	0.93935	1.8611
24	56	0.9399	1.9289
24	58	0.94039	1.9968
24	60	0.94092	2.0645
24	62	0.94148	2.132
24	64	0.94208	2.1994
24	66	0.93528	2.2846
24	68	0.93599	2.3521
24	70	0.93674	2.4193
24	72	0.93751	2.4864
24	74	0.93831	2.5533
24	76	0.93915	2.6199
24	78	0.93993	2.6866
24	80	0.94075	2.7531
24	82	0.94162	2.8193
24	84	0.93673	2.9032
24	86	0.93784	2.9688
24	88	0.93901	3.0341
24	90	0.94025	3.0989
24	92	0.94157	3.1633
24	94	0.93778	3.2452
24	96	0.93943	3.3084
24	98	0.94123	3.3708
24	100	0.93832	3.4503
32	2	0.21573	0.30014
32	4	0.41949	0.3087
32	6	0.61154	0.31764
32	8	0.79213	0.32697
32	10	0.91755	0.35284
32	12	0.92252	0.42113
32	14	0.90098	0.50306
32	16	0.90854	0.57014
32	18	0.91292	0.63833

32	20	0.91504	0.70762
32	22	0.91687	0.77683
32	24	0.91851	0.84594
32	26	0.92001	0.91493
32	28	0.92073	0.98454
32	30	0.92118	1.0544
32	32	0.92176	1.1239
32	34	0.92242	1.1933
32	36	0.92279	1.263
32	38	0.92293	1.333
32	40	0.91163	1.4205
32	42	0.91251	1.4901
32	44	0.91319	1.5599
32	46	0.91369	1.6299
32	48	0.91425	1.6997
32	50	0.91486	1.7694
32	52	0.91533	1.8392
32	54	0.91569	1.9092
32	56	0.9161	1.979
32	58	0.91655	2.0487
32	60	0.9169	2.1186
32	62	0.91718	2.1885
32	64	0.9175	2.2583
32	66	0.91786	2.328
32	68	0.91814	2.3978
32	70	0.91837	2.4677
32	72	0.91864	2.5374
32	74	0.91894	2.6071
32	76	0.91918	2.6769
32	78	0.91938	2.7467
32	80	0.91962	2.8164
32	82	0.91988	2.886
32	84	0.9201	2.9556
32	86	0.92029	3.0254
32	88	0.92051	3.095
32	90	0.92075	3.1645
32	92	0.92097	3.2341
32	94	0.92116	3.3037
32	96	0.92137	3.3732
32	98	0.9216	3.4427
32	100	0.92183	3.512

A.2 Throughput como función del número de slots de contención (R) y parámetro Ex (longitud del mensaje). Para U=40 usuarios.

No. Slots de Contención (R)	Throughput (Mensaje=50 bytes)	Throughput (Mensaje=100 bytes)	Throughput (Mensaje=200 bytes)	Throughput (Mensaje=400 bytes)
2	2.62E-08	3.81E-08	6.66E-08	1.14E-07
4	0.00348358	0.0050791	0.0089	0.015474
6	0.04176677	0.06153	0.1111	0.20171
8	0.11469312	0.17013	0.3128	0.58734
10	0.20006903	0.29743	0.5497	0.97464
12	0.28770921	0.42763	0.789	0.96666
14	0.37394467	0.55493	0.9585	0.96184

16	0.45737753	0.67711	0.9564	0.9542
18	0.53746047	0.7933	0.9472	0.95568
20	0.61401795	0.90325	0.942	0.95052
22	0.68705706	0.94292	0.9428	0.94574
24	0.75667938	0.93234	0.9344	0.9412
26	0.82303452	0.9297	0.9276	0.9368
28	0.88629425	0.92224	0.9218	0.9325
30	0.92626648	0.92182	0.9165	0.92122
32	0.92245788	0.90864	0.9116	0.9171

A.3 Throughput como función del número de usuarios y parámetro Ex (longitud del mensaje). Para R=8 slots de contención

No. de Usuarios (U)	Throughput (Mensaje=50 bytes)	Throughput (Mensaje=100 bytes)	Throughput (Mensaje=200 bytes)	Throughput (Mensaje=400 bytes)
2	0.14524	0.17359002	0.20643	2.26E-01
4	0.20671	0.2709758	0.36579	0.43033
6	0.23812	0.32712788	0.48324	0.61131
8	0.25371	0.35825452	0.56487	0.76643
10	0.2598	0.37327789	0.61703	0.89376
12	0.25982	0.37758311	0.6458	0.97737
14	0.2558	0.37460257	0.65658	0.97256
16	0.24902	0.36660161	0.6539	0.96939
18	0.24033	0.35511335	0.64132	0.97485
20	0.23033	0.34119843	0.62162	0.97988
22	0.21943	0.32560794	0.59684	0.97734
24	0.20792	0.30888888	0.56855	0.97274
26	0.19605	0.29145232	0.53789	0.97841
28	0.18399	0.27361895	0.50575	0.95225
30	0.17189	0.25564684	0.47283	0.8936
32	0.15989	0.23774973	0.43967	0.83227
34	0.14808	0.22010778	0.40674	0.76983
36	0.13656	0.20287389	0.37442	0.70755
38	0.12541	0.1861773	0.34302	0.64645
40	0.11469	0.17012558	0.3128	0.58734
42	0.10446	0.15480593	0.28396	0.53087
44	0.094758	0.14028613	0.25667	0.47749
46	0.085614	0.12661555	0.23103	0.42753
48	0.07705	0.1138263	0.20711	0.38118
50	0.069077	0.10193461	0.18494	0.3385
52	0.061695	0.09094234	0.16453	0.29949
54	0.054901	0.08083876	0.14584	0.26406
56	0.048679	0.07160229	0.12883	0.23206
58	0.043012	0.06320242	0.11342	0.2033
60	0.037876	0.05560146	0.099535	0.1776
62	0.033244	0.04875632	0.087079	0.15471
64	0.029085	0.04262007	0.075955	0.13441
66	0.025368	0.03714342	0.066063	0.11648
68	0.02206	0.03227598	0.0573	0.1007
70	0.019128	0.02796737	0.049567	0.086847
72	0.01654	0.02416805	0.042768	0.074733
74	0.014263	0.02083014	0.036811	0.064167
76	0.012268	0.01790789	0.031608	0.054979
78	0.010526	0.01535812	0.027077	0.047009
80	0.00901	0.01314049	0.023145	0.040114

82	0.0076943	0.01121765	0.019741	0.034163
84	0.0065562	0.0095553	0.016803	0.02904
86	0.0055744	0.0081222	0.014273	0.02464
88	0.0047299	0.00689004	0.012101	0.020869
90	0.0040054	0.00583338	0.01024	0.017644
92	0.0033853	0.00492946	0.0086491	0.014892
94	0.002856	0.00415802	0.0072928	0.012549
96	0.0024051	0.00350114	0.0061386	0.010557
98	0.002022	0.00294303	0.0051586	0.0088671
100	0.001697	0.00246983	0.0043281	2.26E-01

**A.4 Throughput como función del número de slots de contención (R) y parámetro U.
Para longitud del mensaje=200 bytes.**

No. Slots de Contención (R)	Throughput (Usuarios=20)	Throughput (Usuarios=40)	Throughput (Usuarios=80)
2	0.00207319	6.66E-08	2.02E-18
4	0.15314206	0.0089	2.40E-06
6	0.39643528	0.1111	0.0015413
8	0.6216151	0.3128	0.023145
10	0.81301939	0.5497	0.097368
12	0.96773537	0.789	0.23318
14	0.96457374	0.9585	0.41728
16	0.95153528	0.9564	0.63179
18	0.93890865	0.9472	0.86255
20	0.95009834	0.942	0.95123
22	0.94240873	0.9428	0.94274
24	0.93580489	0.9344	0.94075
26	0.92995169	0.9276	0.93167
28	0.92462862	0.9218	0.92132
30	0.91969024	0.9165	0.91845
32	0.91503856	0.9116	0.91689

APÉNDICE B

Programa en Matlab 7.0 para la simulación de la eficiencia del stack de protocolos GPRS.

- Eficiencia.m

```
%*****
%Solicitud del esquema de codificación deseado
%*****
Esq_Cod=input('Cual es el esquema de codificacion usado(CS1, CS2, CS3 o CS4): ','s')

%*****
%Definición de Encabezados
%*****
TCPH=32;           %Encabezado TCP
IPH=20;           %Encabezado IP
SNDCPH=4;         %Encabezado Sndcp
LLCh=6;          %Encabezado LLC
RLCh=2;          %Encabezado RLC
MACH=1;          %Encabezado MAC
Tail=3;          %Tail en la capa física GSM
USF=1;           %USF en la capa física GSM
TS=26;
Guard=8.25;      %Bloque de guarda en la capa física GSM

switch Esq_Cod    %Evaluamos el esquema de codificación
case 'CS1'
    RLCp=20;      %Payload RLC
    CodeRate=2;   %Tasa de codificación=1/2
    Spareb=0;     %Bits de spare
    USFa=3;       %Bits USF en la capa GPRS física
    USFPc=3;      %Bits USF precodificados en la capa GPRS física
    BCS=40;       %Block Check Sequence
    Taila=4;      %Bits de tail en la capa GPRS física
    Punctb=0;     %Bits de puncturing (perforación)
case 'CS2'
    RLCp=30;
    CodeRate=2;
    Spareb=7;
    USFa=3;
    USFPc=6;
    BCS=16;
    Taila=4;
    Punctb=132;
case 'CS3'
    RLCp=36;
    CodeRate=2;
    Spareb=3;
    USFa=3;
    USFPc=6;
```

```

BCS=16;
Taila=4;
Punctb=220;
case 'CS4'
  RLCp=50;
  CodeRate=1;          %Tasa de codificación=1
  Spareb=7;
  USFa=3;
  USFPc=12;
  BCS=16;
  Taila=0;
  Punctb=0;
end

%*****
%Cálculo para 1 byte de datos
%*****
i=1;
PDU=1                    %Tamaño del paquete (bytes)
TCP_PDU=PDU+TCPPh;      %Datos en la capa TCP (bytes)
IP_PDU=TCP_PDU+IPh;     %Datos en la capa IP (bytes)
SNDCP_PDU=IP_PDU+SNDCPh; %Datos en la capa SNDCP (bytes)
LLC_PDU=SNDCP_PDU+LLCh; %Datos en la capa LLC (bytes)
n=ceil(LLC_PDU/RLCp);   %Número de bloques RLC necesarios
RLCt=(RLCp+RLCh)*n;    %Datos en la capa RLC (bytes)
RLC_MACt=RLCt+(MACH*n); %Datos en la capa RLC/MAC (bytes)
RLC_MACb=(RLCp+RLCh+MACH)*8; %Datos RLC/MAC (bits) 1 byte=8 bits
GPRSphyb=RLC_MACb+Spareb-USFa+USFPc+BCS+Taila; %Bloque RLC/MAC (bits) sin
                                                codificar
GPRSphyt=GPRSphyb*n/8; %Bytes totales sin codificar en la capa
GPRS                               %Bytes totales sin codificar en la capa
GPRSphybc=GPRSphyb*CodeRate-Punctb; %Bloque RLC/MAC (codificado)
GPRSphytc=GPRSphybc*n/8; %Bytes totales en la capa física GPRS
GSMPhyts=(GPRSphybc/4)+(Tail*2)+(USF*2)+TS+Guard; %Bits por time slot en la capa
                                                física GSM
frame=GSMPhyts*4; %Bits totales por frame
PDTCH=frame*n; %Bits totales a transmitir
PDTCHb=PDTCH/8; %Bytes totales a transmitir
eTCP(i)=PDU/TCP_PDU;
eIP(i)=PDU/IP_PDU;
eSNDCP(i)=PDU/SNDCP_PDU;
eLLC(i)=PDU/LLC_PDU;
eRLCMAC(i)=PDU/RLC_MACt;
eGPRS(i)=PDU/GPRSphyt;
eGPRSc(i)=PDU/GPRSphytc;
eGSM(i)=PDU/PDTCHb;
oh_protocol=fopen('overhead.xls','a+');
eff_protocol=fopen('effic.xls','a+');
fprintf(oh_protocol,'%s \t %6.0f \t %6.2f \t
%6.2f \t %6.4f \t \n', Esq_Cod, PDU, TCP_PDU, IP_PDU, SNDCP_PDU, LLC_PDU, n,
RLC_MACt, GPRSphyt, GPRSphytc,PDTCHb);

```


Resultados arrojados por el programa en Matlab

Todos los resultados que a continuación se listan fueron obtenidos del algoritmo de Matlab anteriormente mostrado.

B.1 No. de datos en cada una de las capas del stack de protocolos

Coding	PDU (bytes)	TCP (bytes)	IP (bytes)	SNDCP (bytes)	LLC (bytes)	N bloq. RLC	RLC/MAC (bytes)	GPRS (bytes)	GPRS coded (bytes)	GSM (bytes)
CS1	1	33	53	57	63	4	92	114	228	312.5
CS1	20	52	72	76	82	5	115	142.5	285	390.625
CS1	40	72	92	96	102	6	138	171	342	468.75
CS1	60	92	112	116	122	7	161	199.5	399	546.875
CS1	80	112	132	136	142	8	184	228	456	625
CS1	100	132	152	156	162	9	207	256.5	513	703.125
CS1	120	152	172	176	182	10	230	285	570	781.25
CS1	140	172	192	196	202	11	253	313.5	627	859.375
CS1	160	192	212	216	222	12	276	342	684	937.5
CS1	180	212	232	236	242	13	299	370.5	741	1015.625
CS1	200	232	252	256	262	14	322	399	798	1093.75
CS1	220	252	272	276	282	15	345	427.5	855	1171.875
CS1	240	272	292	296	302	16	368	456	912	1250
CS1	260	292	312	316	322	17	391	484.5	969	1328.125
CS1	280	312	332	336	342	18	414	513	1026	1406.25
CS1	300	332	352	356	362	19	437	541.5	1083	1484.375
CS1	320	352	372	376	382	20	460	570	1140	1562.5
CS1	340	372	392	396	402	21	483	598.5	1197	1640.625
CS1	360	392	412	416	422	22	506	627	1254	1718.75
CS1	380	412	432	436	442	23	529	655.5	1311	1796.875
CS1	400	432	452	456	462	24	552	684	1368	1875
CS1	420	452	472	476	482	25	575	712.5	1425	1953.125
CS1	440	472	492	496	502	26	598	741	1482	2031.25
CS1	460	492	512	516	522	27	621	769.5	1539	2109.375
CS1	480	512	532	536	542	28	644	798	1596	2187.5
CS1	500	532	552	556	562	29	667	826.5	1653	2265.625
CS1	520	552	572	576	582	30	690	855	1710	2343.75
CS1	540	572	592	596	602	31	713	883.5	1767	2421.875
CS1	560	592	612	616	622	32	736	912	1824	2500
CS1	580	612	632	636	642	33	759	940.5	1881	2578.125
CS1	600	632	652	656	662	34	782	969	1938	2656.25
CS1	620	652	672	676	682	35	805	997.5	1995	2734.375
CS1	640	672	692	696	702	36	828	1026	2052	2812.5
CS1	660	692	712	716	722	37	851	1054.5	2109	2890.625
CS1	680	712	732	736	742	38	874	1083	2166	2968.75
CS1	700	732	752	756	762	39	897	1111.5	2223	3046.875
CS1	720	752	772	776	782	40	920	1140	2280	3125
CS1	740	772	792	796	802	41	943	1168.5	2337	3203.125
CS1	760	792	812	816	822	42	966	1197	2394	3281.25
CS1	780	812	832	836	842	43	989	1225.5	2451	3359.375
CS1	800	832	852	856	862	44	1012	1254	2508	3437.5
CS1	820	852	872	876	882	45	1035	1282.5	2565	3515.625
CS1	840	872	892	896	902	46	1058	1311	2622	3593.75
CS1	860	892	912	916	922	47	1081	1339.5	2679	3671.875

CS1	880	912	932	936	942	48	1104	1368	2736	3750
CS1	900	932	952	956	962	49	1127	1396.5	2793	3828.125
CS1	920	952	972	976	982	50	1150	1425	2850	3906.25
CS1	940	972	992	996	1002	51	1173	1453.5	2907	3984.375
CS1	960	992	1012	1016	1022	52	1196	1482	2964	4062.5
CS1	980	1012	1032	1036	1042	53	1219	1510.5	3021	4140.625
CS1	1000	1032	1052	1056	1062	54	1242	1539	3078	4218.75
CS1	1020	1052	1072	1076	1082	55	1265	1567.5	3135	4296.875
CS1	1040	1072	1092	1096	1102	56	1288	1596	3192	4375
CS1	1060	1092	1112	1116	1122	57	1311	1624.5	3249	4453.125
CS1	1080	1112	1132	1136	1142	58	1334	1653	3306	4531.25
CS1	1100	1132	1152	1156	1162	59	1357	1681.5	3363	4609.375
CS1	1120	1152	1172	1176	1182	60	1380	1710	3420	4687.5
CS1	1140	1172	1192	1196	1202	61	1403	1738.5	3477	4765.625
CS1	1160	1192	1212	1216	1222	62	1426	1767	3534	4843.75
CS1	1180	1212	1232	1236	1242	63	1449	1795.5	3591	4921.875
CS1	1200	1232	1252	1256	1262	64	1472	1824	3648	5000
CS1	1220	1252	1272	1276	1282	65	1495	1852.5	3705	5078.125
CS1	1240	1272	1292	1296	1302	66	1518	1881	3762	5156.25
CS1	1260	1292	1312	1316	1322	67	1541	1909.5	3819	5234.375
CS1	1280	1312	1332	1336	1342	68	1564	1938	3876	5312.5
CS1	1300	1332	1352	1356	1362	69	1587	1966.5	3933	5390.625
CS1	1320	1352	1372	1376	1382	70	1610	1995	3990	5468.75
CS1	1340	1372	1392	1396	1402	71	1633	2023.5	4047	5546.875
CS1	1360	1392	1412	1416	1422	72	1656	2052	4104	5625
CS1	1380	1412	1432	1436	1442	73	1679	2080.5	4161	5703.125
CS1	1400	1432	1452	1456	1462	74	1702	2109	4218	5781.25
CS1	1420	1452	1472	1476	1482	75	1725	2137.5	4275	5859.375
CS1	1440	1472	1492	1496	1502	76	1748	2166	4332	5937.5
CS1	1460	1492	1512	1516	1522	77	1771	2194.5	4389	6015.625
CS1	1480	1512	1532	1536	1542	78	1794	2223	4446	6093.75
CS1	1500	1532	1552	1556	1562	79	1817	2251.5	4503	6171.875
CS1	1520	1552	1572	1576	1582	80	1840	2280	4560	6250
CS1	1540	1572	1592	1596	1602	81	1863	2308.5	4617	6328.125
CS1	1560	1592	1612	1616	1622	82	1886	2337	4674	6406.25
CS1	1580	1612	1632	1636	1642	83	1909	2365.5	4731	6484.375
CS1	1600	1632	1652	1656	1662	84	1932	2394	4788	6562.5

Coding	PDU (bytes)	TCP (bytes)	IP (bytes)	SNDCP (bytes)	LLC (bytes)	N bloq. RLC	RLC/MAC (bytes)	GPRS (bytes)	GPRS coded (bytes)	GSM (bytes)
CS2	1	33	53	57	63	3	99	110.25	171	234.375
CS2	20	52	72	76	82	3	99	110.25	171	234.375
CS2	40	72	92	96	102	4	132	147	228	312.5
CS2	60	92	112	116	122	5	165	183.75	285	390.625
CS2	80	112	132	136	142	5	165	183.75	285	390.625
CS2	100	132	152	156	162	6	198	220.5	342	468.75
CS2	120	152	172	176	182	7	231	257.25	399	546.875
CS2	140	172	192	196	202	7	231	257.25	399	546.875
CS2	160	192	212	216	222	8	264	294	456	625
CS2	180	212	232	236	242	9	297	330.75	513	703.125
CS2	200	232	252	256	262	9	297	330.75	513	703.125
CS2	220	252	272	276	282	10	330	367.5	570	781.25

CS2	240	272	292	296	302	11	363	404.25	627	859.375
CS2	260	292	312	316	322	11	363	404.25	627	859.375
CS2	280	312	332	336	342	12	396	441	684	937.5
CS2	300	332	352	356	362	13	429	477.75	741	1015.625
CS2	320	352	372	376	382	13	429	477.75	741	1015.625
CS2	340	372	392	396	402	14	462	514.5	798	1093.75
CS2	360	392	412	416	422	15	495	551.25	855	1171.875
CS2	380	412	432	436	442	15	495	551.25	855	1171.875
CS2	400	432	452	456	462	16	528	588	912	1250
CS2	420	452	472	476	482	17	561	624.75	969	1328.125
CS2	440	472	492	496	502	17	561	624.75	969	1328.125
CS2	460	492	512	516	522	18	594	661.5	1026	1406.25
CS2	480	512	532	536	542	19	627	698.25	1083	1484.375
CS2	500	532	552	556	562	19	627	698.25	1083	1484.375
CS2	520	552	572	576	582	20	660	735	1140	1562.5
CS2	540	572	592	596	602	21	693	771.75	1197	1640.625
CS2	560	592	612	616	622	21	693	771.75	1197	1640.625
CS2	580	612	632	636	642	22	726	808.5	1254	1718.75
CS2	600	632	652	656	662	23	759	845.25	1311	1796.875
CS2	620	652	672	676	682	23	759	845.25	1311	1796.875
CS2	640	672	692	696	702	24	792	882	1368	1875
CS2	660	692	712	716	722	25	825	918.75	1425	1953.125
CS2	680	712	732	736	742	25	825	918.75	1425	1953.125
CS2	700	732	752	756	762	26	858	955.5	1482	2031.25
CS2	720	752	772	776	782	27	891	992.25	1539	2109.375
CS2	740	772	792	796	802	27	891	992.25	1539	2109.375
CS2	760	792	812	816	822	28	924	1029	1596	2187.5
CS2	780	812	832	836	842	29	957	1065.75	1653	2265.625
CS2	800	832	852	856	862	29	957	1065.75	1653	2265.625
CS2	820	852	872	876	882	30	990	1102.5	1710	2343.75
CS2	840	872	892	896	902	31	1023	1139.25	1767	2421.875
CS2	860	892	912	916	922	31	1023	1139.25	1767	2421.875
CS2	880	912	932	936	942	32	1056	1176	1824	2500
CS2	900	932	952	956	962	33	1089	1212.75	1881	2578.125
CS2	920	952	972	976	982	33	1089	1212.75	1881	2578.125
CS2	940	972	992	996	1002	34	1122	1249.5	1938	2656.25
CS2	960	992	1012	1016	1022	35	1155	1286.25	1995	2734.375
CS2	980	1012	1032	1036	1042	35	1155	1286.25	1995	2734.375
CS2	1000	1032	1052	1056	1062	36	1188	1323	2052	2812.5
CS2	1020	1052	1072	1076	1082	37	1221	1359.75	2109	2890.625
CS2	1040	1072	1092	1096	1102	37	1221	1359.75	2109	2890.625
CS2	1060	1092	1112	1116	1122	38	1254	1396.5	2166	2968.75
CS2	1080	1112	1132	1136	1142	39	1287	1433.25	2223	3046.875
CS2	1100	1132	1152	1156	1162	39	1287	1433.25	2223	3046.875
CS2	1120	1152	1172	1176	1182	40	1320	1470	2280	3125
CS2	1140	1172	1192	1196	1202	41	1353	1506.75	2337	3203.125
CS2	1160	1192	1212	1216	1222	41	1353	1506.75	2337	3203.125
CS2	1180	1212	1232	1236	1242	42	1386	1543.5	2394	3281.25
CS2	1200	1232	1252	1256	1262	43	1419	1580.25	2451	3359.375
CS2	1220	1252	1272	1276	1282	43	1419	1580.25	2451	3359.375
CS2	1240	1272	1292	1296	1302	44	1452	1617	2508	3437.5
CS2	1260	1292	1312	1316	1322	45	1485	1653.75	2565	3515.625
CS2	1280	1312	1332	1336	1342	45	1485	1653.75	2565	3515.625
CS2	1300	1332	1352	1356	1362	46	1518	1690.5	2622	3593.75

CS2	1320	1352	1372	1376	1382	47	1551	1727.25	2679	3671.875
CS2	1340	1372	1392	1396	1402	47	1551	1727.25	2679	3671.875
CS2	1360	1392	1412	1416	1422	48	1584	1764	2736	3750
CS2	1380	1412	1432	1436	1442	49	1617	1800.75	2793	3828.125
CS2	1400	1432	1452	1456	1462	49	1617	1800.75	2793	3828.125
CS2	1420	1452	1472	1476	1482	50	1650	1837.5	2850	3906.25
CS2	1440	1472	1492	1496	1502	51	1683	1874.25	2907	3984.375
CS2	1460	1492	1512	1516	1522	51	1683	1874.25	2907	3984.375
CS2	1480	1512	1532	1536	1542	52	1716	1911	2964	4062.5
CS2	1500	1532	1552	1556	1562	53	1749	1947.75	3021	4140.625
CS2	1520	1552	1572	1576	1582	53	1749	1947.75	3021	4140.625
CS2	1540	1572	1592	1596	1602	54	1782	1984.5	3078	4218.75
CS2	1560	1592	1612	1616	1622	55	1815	2021.25	3135	4296.875
CS2	1580	1612	1632	1636	1642	55	1815	2021.25	3135	4296.875
CS2	1600	1632	1652	1656	1662	56	1848	2058	3192	4375

Coding	PDU (bytes)	TCP (bytes)	IP (bytes)	SNDCP (bytes)	LLC (bytes)	N bloq. RLC	RLC/MAC (bytes)	GPRS (bytes)	GPRS coded (bytes)	GSM (bytes)
CS3	1	33	53	57	63	2	78	84.5	114	156.25
CS3	20	52	72	76	82	3	117	126.75	171	234.375
CS3	40	72	92	96	102	3	117	126.75	171	234.375
CS3	60	92	112	116	122	4	156	169	228	312.5
CS3	80	112	132	136	142	4	156	169	228	312.5
CS3	100	132	152	156	162	5	195	211.25	285	390.625
CS3	120	152	172	176	182	6	234	253.5	342	468.75
CS3	140	172	192	196	202	6	234	253.5	342	468.75
CS3	160	192	212	216	222	7	273	295.75	399	546.875
CS3	180	212	232	236	242	7	273	295.75	399	546.875
CS3	200	232	252	256	262	8	312	338	456	625
CS3	220	252	272	276	282	8	312	338	456	625
CS3	240	272	292	296	302	9	351	380.25	513	703.125
CS3	260	292	312	316	322	9	351	380.25	513	703.125
CS3	280	312	332	336	342	10	390	422.5	570	781.25
CS3	300	332	352	356	362	11	429	464.75	627	859.375
CS3	320	352	372	376	382	11	429	464.75	627	859.375
CS3	340	372	392	396	402	12	468	507	684	937.5
CS3	360	392	412	416	422	12	468	507	684	937.5
CS3	380	412	432	436	442	13	507	549.25	741	1015.625
CS3	400	432	452	456	462	13	507	549.25	741	1015.625
CS3	420	452	472	476	482	14	546	591.5	798	1093.75
CS3	440	472	492	496	502	14	546	591.5	798	1093.75
CS3	460	492	512	516	522	15	585	633.75	855	1171.875
CS3	480	512	532	536	542	16	624	676	912	1250
CS3	500	532	552	556	562	16	624	676	912	1250
CS3	520	552	572	576	582	17	663	718.25	969	1328.125
CS3	540	572	592	596	602	17	663	718.25	969	1328.125
CS3	560	592	612	616	622	18	702	760.5	1026	1406.25
CS3	580	612	632	636	642	18	702	760.5	1026	1406.25
CS3	600	632	652	656	662	19	741	802.75	1083	1484.375
CS3	620	652	672	676	682	19	741	802.75	1083	1484.375
CS3	640	672	692	696	702	20	780	845	1140	1562.5
CS3	660	692	712	716	722	21	819	887.25	1197	1640.625
CS3	680	712	732	736	742	21	819	887.25	1197	1640.625

CS3	700	732	752	756	762	22	858	929.5	1254	1718.75
CS3	720	752	772	776	782	22	858	929.5	1254	1718.75
CS3	740	772	792	796	802	23	897	971.75	1311	1796.875
CS3	760	792	812	816	822	23	897	971.75	1311	1796.875
CS3	780	812	832	836	842	24	936	1014	1368	1875
CS3	800	832	852	856	862	24	936	1014	1368	1875
CS3	820	852	872	876	882	25	975	1056.25	1425	1953.125
CS3	840	872	892	896	902	26	1014	1098.5	1482	2031.25
CS3	860	892	912	916	922	26	1014	1098.5	1482	2031.25
CS3	880	912	932	936	942	27	1053	1140.75	1539	2109.375
CS3	900	932	952	956	962	27	1053	1140.75	1539	2109.375
CS3	920	952	972	976	982	28	1092	1183	1596	2187.5
CS3	940	972	992	996	1002	28	1092	1183	1596	2187.5
CS3	960	992	1012	1016	1022	29	1131	1225.25	1653	2265.625
CS3	980	1012	1032	1036	1042	29	1131	1225.25	1653	2265.625
CS3	1000	1032	1052	1056	1062	30	1170	1267.5	1710	2343.75
CS3	1020	1052	1072	1076	1082	31	1209	1309.75	1767	2421.875
CS3	1040	1072	1092	1096	1102	31	1209	1309.75	1767	2421.875
CS3	1060	1092	1112	1116	1122	32	1248	1352	1824	2500
CS3	1080	1112	1132	1136	1142	32	1248	1352	1824	2500
CS3	1100	1132	1152	1156	1162	33	1287	1394.25	1881	2578.125
CS3	1120	1152	1172	1176	1182	33	1287	1394.25	1881	2578.125
CS3	1140	1172	1192	1196	1202	34	1326	1436.5	1938	2656.25
CS3	1160	1192	1212	1216	1222	34	1326	1436.5	1938	2656.25
CS3	1180	1212	1232	1236	1242	35	1365	1478.75	1995	2734.375
CS3	1200	1232	1252	1256	1262	36	1404	1521	2052	2812.5
CS3	1220	1252	1272	1276	1282	36	1404	1521	2052	2812.5
CS3	1240	1272	1292	1296	1302	37	1443	1563.25	2109	2890.625
CS3	1260	1292	1312	1316	1322	37	1443	1563.25	2109	2890.625
CS3	1280	1312	1332	1336	1342	38	1482	1605.5	2166	2968.75
CS3	1300	1332	1352	1356	1362	38	1482	1605.5	2166	2968.75
CS3	1320	1352	1372	1376	1382	39	1521	1647.75	2223	3046.875
CS3	1340	1372	1392	1396	1402	39	1521	1647.75	2223	3046.875
CS3	1360	1392	1412	1416	1422	40	1560	1690	2280	3125
CS3	1380	1412	1432	1436	1442	41	1599	1732.25	2337	3203.125
CS3	1400	1432	1452	1456	1462	41	1599	1732.25	2337	3203.125
CS3	1420	1452	1472	1476	1482	42	1638	1774.5	2394	3281.25
CS3	1440	1472	1492	1496	1502	42	1638	1774.5	2394	3281.25
CS3	1460	1492	1512	1516	1522	43	1677	1816.75	2451	3359.375
CS3	1480	1512	1532	1536	1542	43	1677	1816.75	2451	3359.375
CS3	1500	1532	1552	1556	1562	44	1716	1859	2508	3437.5
CS3	1520	1552	1572	1576	1582	44	1716	1859	2508	3437.5
CS3	1540	1572	1592	1596	1602	45	1755	1901.25	2565	3515.625
CS3	1560	1592	1612	1616	1622	46	1794	1943.5	2622	3593.75
CS3	1580	1612	1632	1636	1642	46	1794	1943.5	2622	3593.75
CS3	1600	1632	1652	1656	1662	47	1833	1985.75	2679	3671.875

Coding	PDU (bytes)	TCP (bytes)	IP (bytes)	SNDP (bytes)	LLC (bytes)	N bloq. RLC	RLC/MAC (bytes)	GPRS (bytes)	GPRS coded (bytes)	GSM (bytes)
CS4	1	33	53	57	63	2	106	114	114	156.25
CS4	20	52	72	76	82	2	106	114	114	156.25
CS4	40	72	92	96	102	3	159	171	171	234.375
CS4	60	92	112	116	122	3	159	171	171	234.375

CS4	80	112	132	136	142	3	159	171	171	234.375
CS4	100	132	152	156	162	4	212	228	228	312.5
CS4	120	152	172	176	182	4	212	228	228	312.5
CS4	140	172	192	196	202	5	265	285	285	390.625
CS4	160	192	212	216	222	5	265	285	285	390.625
CS4	180	212	232	236	242	5	265	285	285	390.625
CS4	200	232	252	256	262	6	318	342	342	468.75
CS4	220	252	272	276	282	6	318	342	342	468.75
CS4	240	272	292	296	302	7	371	399	399	546.875
CS4	260	292	312	316	322	7	371	399	399	546.875
CS4	280	312	332	336	342	7	371	399	399	546.875
CS4	300	332	352	356	362	8	424	456	456	625
CS4	320	352	372	376	382	8	424	456	456	625
CS4	340	372	392	396	402	9	477	513	513	703.125
CS4	360	392	412	416	422	9	477	513	513	703.125
CS4	380	412	432	436	442	9	477	513	513	703.125
CS4	400	432	452	456	462	10	530	570	570	781.25
CS4	420	452	472	476	482	10	530	570	570	781.25
CS4	440	472	492	496	502	11	583	627	627	859.375
CS4	460	492	512	516	522	11	583	627	627	859.375
CS4	480	512	532	536	542	11	583	627	627	859.375
CS4	500	532	552	556	562	12	636	684	684	937.5
CS4	520	552	572	576	582	12	636	684	684	937.5
CS4	540	572	592	596	602	13	689	741	741	1015.625
CS4	560	592	612	616	622	13	689	741	741	1015.625
CS4	580	612	632	636	642	13	689	741	741	1015.625
CS4	600	632	652	656	662	14	742	798	798	1093.75
CS4	620	652	672	676	682	14	742	798	798	1093.75
CS4	640	672	692	696	702	15	795	855	855	1171.875
CS4	660	692	712	716	722	15	795	855	855	1171.875
CS4	680	712	732	736	742	15	795	855	855	1171.875
CS4	700	732	752	756	762	16	848	912	912	1250
CS4	720	752	772	776	782	16	848	912	912	1250
CS4	740	772	792	796	802	17	901	969	969	1328.125
CS4	760	792	812	816	822	17	901	969	969	1328.125
CS4	780	812	832	836	842	17	901	969	969	1328.125
CS4	800	832	852	856	862	18	954	1026	1026	1406.25
CS4	820	852	872	876	882	18	954	1026	1026	1406.25
CS4	840	872	892	896	902	19	1007	1083	1083	1484.375
CS4	860	892	912	916	922	19	1007	1083	1083	1484.375
CS4	880	912	932	936	942	19	1007	1083	1083	1484.375
CS4	900	932	952	956	962	20	1060	1140	1140	1562.5
CS4	920	952	972	976	982	20	1060	1140	1140	1562.5
CS4	940	972	992	996	1002	21	1113	1197	1197	1640.625
CS4	960	992	1012	1016	1022	21	1113	1197	1197	1640.625
CS4	980	1012	1032	1036	1042	21	1113	1197	1197	1640.625
CS4	1000	1032	1052	1056	1062	22	1166	1254	1254	1718.75
CS4	1020	1052	1072	1076	1082	22	1166	1254	1254	1718.75
CS4	1040	1072	1092	1096	1102	23	1219	1311	1311	1796.875
CS4	1060	1092	1112	1116	1122	23	1219	1311	1311	1796.875
CS4	1080	1112	1132	1136	1142	23	1219	1311	1311	1796.875
CS4	1100	1132	1152	1156	1162	24	1272	1368	1368	1875
CS4	1120	1152	1172	1176	1182	24	1272	1368	1368	1875
CS4	1140	1172	1192	1196	1202	25	1325	1425	1425	1953.125

CS4	1160	1192	1212	1216	1222	25	1325	1425	1425	1953.125
CS4	1180	1212	1232	1236	1242	25	1325	1425	1425	1953.125
CS4	1200	1232	1252	1256	1262	26	1378	1482	1482	2031.25
CS4	1220	1252	1272	1276	1282	26	1378	1482	1482	2031.25
CS4	1240	1272	1292	1296	1302	27	1431	1539	1539	2109.375
CS4	1260	1292	1312	1316	1322	27	1431	1539	1539	2109.375
CS4	1280	1312	1332	1336	1342	27	1431	1539	1539	2109.375
CS4	1300	1332	1352	1356	1362	28	1484	1596	1596	2187.5
CS4	1320	1352	1372	1376	1382	28	1484	1596	1596	2187.5
CS4	1340	1372	1392	1396	1402	29	1537	1653	1653	2265.625
CS4	1360	1392	1412	1416	1422	29	1537	1653	1653	2265.625
CS4	1380	1412	1432	1436	1442	29	1537	1653	1653	2265.625
CS4	1400	1432	1452	1456	1462	30	1590	1710	1710	2343.75
CS4	1420	1452	1472	1476	1482	30	1590	1710	1710	2343.75
CS4	1440	1472	1492	1496	1502	31	1643	1767	1767	2421.875
CS4	1460	1492	1512	1516	1522	31	1643	1767	1767	2421.875
CS4	1480	1512	1532	1536	1542	31	1643	1767	1767	2421.875
CS4	1500	1532	1552	1556	1562	32	1696	1824	1824	2500
CS4	1520	1552	1572	1576	1582	32	1696	1824	1824	2500
CS4	1540	1572	1592	1596	1602	33	1749	1881	1881	2578.125
CS4	1560	1592	1612	1616	1622	33	1749	1881	1881	2578.125
CS4	1580	1612	1632	1636	1642	33	1749	1881	1881	2578.125
CS4	1600	1632	1652	1656	1662	34	1802	1938	1938	2656.25

B.2 Eficiencia en cada una de las capas del stack de protocolos

Coding	PDU	TCP	IP	SNDCP	LLC	RLC/MAC	GPRS	GPRS coded	GSM
	Eficiencia								
CS1	1	0.0303	0.0189	0.0175	0.0159	0.0109	0.0088	0.0044	0.0032
CS1	20	0.3846	0.2778	0.2632	0.2439	0.1739	0.1404	0.0702	0.0512
CS1	40	0.5556	0.4348	0.4167	0.3922	0.2899	0.2339	0.117	0.0853
CS1	60	0.6522	0.5357	0.5172	0.4918	0.3727	0.3008	0.1504	0.1097
CS1	80	0.7143	0.6061	0.5882	0.5634	0.4348	0.3509	0.1754	0.128
CS1	100	0.7576	0.6579	0.641	0.6173	0.4831	0.3899	0.1949	0.1422
CS1	120	0.7895	0.6977	0.6818	0.6593	0.5217	0.4211	0.2105	0.1536
CS1	140	0.814	0.7292	0.7143	0.6931	0.5534	0.4466	0.2233	0.1629
CS1	160	0.8333	0.7547	0.7407	0.7207	0.5797	0.4678	0.2339	0.1707
CS1	180	0.8491	0.7759	0.7627	0.7438	0.602	0.4858	0.2429	0.1772
CS1	200	0.8621	0.7937	0.7813	0.7634	0.6211	0.5013	0.2506	0.1829
CS1	220	0.873	0.8088	0.7971	0.7801	0.6377	0.5146	0.2573	0.1877
CS1	240	0.8824	0.8219	0.8108	0.7947	0.6522	0.5263	0.2632	0.192
CS1	260	0.8904	0.8333	0.8228	0.8075	0.665	0.5366	0.2683	0.1958
CS1	280	0.8974	0.8434	0.8333	0.8187	0.6763	0.5458	0.2729	0.1991
CS1	300	0.9036	0.8523	0.8427	0.8287	0.6865	0.554	0.277	0.2021
CS1	320	0.9091	0.8602	0.8511	0.8377	0.6957	0.5614	0.2807	0.2048
CS1	340	0.914	0.8673	0.8586	0.8458	0.7039	0.5681	0.284	0.2072
CS1	360	0.9184	0.8738	0.8654	0.8531	0.7115	0.5742	0.2871	0.2095
CS1	380	0.9223	0.8796	0.8716	0.8597	0.7183	0.5797	0.2899	0.2115
CS1	400	0.9259	0.885	0.8772	0.8658	0.7246	0.5848	0.2924	0.2133
CS1	420	0.9292	0.8898	0.8824	0.8714	0.7304	0.5895	0.2947	0.215
CS1	440	0.9322	0.8943	0.8871	0.8765	0.7358	0.5938	0.2969	0.2166
CS1	460	0.935	0.8984	0.8915	0.8812	0.7407	0.5978	0.2989	0.2181
CS1	480	0.9375	0.9023	0.8955	0.8856	0.7453	0.6015	0.3008	0.2194

CS1	500	0.9398	0.9058	0.8993	0.8897	0.7496	0.605	0.3025	0.2207
CS1	520	0.942	0.9091	0.9028	0.8935	0.7536	0.6082	0.3041	0.2219
CS1	540	0.9441	0.9122	0.906	0.897	0.7574	0.6112	0.3056	0.223
CS1	560	0.9459	0.915	0.9091	0.9003	0.7609	0.614	0.307	0.224
CS1	580	0.9477	0.9177	0.9119	0.9034	0.7642	0.6167	0.3083	0.225
CS1	600	0.9494	0.9202	0.9146	0.9063	0.7673	0.6192	0.3096	0.2259
CS1	620	0.9509	0.9226	0.9172	0.9091	0.7702	0.6216	0.3108	0.2267
CS1	640	0.9524	0.9249	0.9195	0.9117	0.7729	0.6238	0.3119	0.2276
CS1	660	0.9538	0.927	0.9218	0.9141	0.7756	0.6259	0.3129	0.2283
CS1	680	0.9551	0.929	0.9239	0.9164	0.778	0.6279	0.3139	0.2291
CS1	700	0.9563	0.9309	0.9259	0.9186	0.7804	0.6298	0.3149	0.2297
CS1	720	0.9574	0.9326	0.9278	0.9207	0.7826	0.6316	0.3158	0.2304
CS1	740	0.9585	0.9343	0.9296	0.9227	0.7847	0.6333	0.3166	0.231
CS1	760	0.9596	0.936	0.9314	0.9246	0.7867	0.6349	0.3175	0.2316
CS1	780	0.9606	0.9375	0.933	0.9264	0.7887	0.6365	0.3182	0.2322
CS1	800	0.9615	0.939	0.9346	0.9281	0.7905	0.638	0.319	0.2327
CS1	820	0.9624	0.9404	0.9361	0.9297	0.7923	0.6394	0.3197	0.2332
CS1	840	0.9633	0.9417	0.9375	0.9313	0.794	0.6407	0.3204	0.2337
CS1	860	0.9641	0.943	0.9389	0.9328	0.7956	0.642	0.321	0.2342
CS1	880	0.9649	0.9442	0.9402	0.9342	0.7971	0.6433	0.3216	0.2347
CS1	900	0.9657	0.9454	0.9414	0.9356	0.7986	0.6445	0.3222	0.2351
CS1	920	0.9664	0.9465	0.9426	0.9369	0.8	0.6456	0.3228	0.2355
CS1	940	0.9671	0.9476	0.9438	0.9381	0.8014	0.6467	0.3234	0.2359
CS1	960	0.9677	0.9486	0.9449	0.9393	0.8027	0.6478	0.3239	0.2363
CS1	980	0.9684	0.9496	0.9459	0.9405	0.8039	0.6488	0.3244	0.2367
CS1	1000	0.969	0.9506	0.947	0.9416	0.8052	0.6498	0.3249	0.237
CS1	1020	0.9696	0.9515	0.948	0.9427	0.8063	0.6507	0.3254	0.2374
CS1	1040	0.9701	0.9524	0.9489	0.9437	0.8075	0.6516	0.3258	0.2377
CS1	1060	0.9707	0.9532	0.9498	0.9447	0.8085	0.6525	0.3263	0.238
CS1	1080	0.9712	0.9541	0.9507	0.9457	0.8096	0.6534	0.3267	0.2383
CS1	1100	0.9717	0.9549	0.9516	0.9466	0.8106	0.6542	0.3271	0.2386
CS1	1120	0.9722	0.9556	0.9524	0.9475	0.8116	0.655	0.3275	0.2389
CS1	1140	0.9727	0.9564	0.9532	0.9484	0.8125	0.6557	0.3279	0.2392
CS1	1160	0.9732	0.9571	0.9539	0.9493	0.8135	0.6565	0.3282	0.2395
CS1	1180	0.9736	0.9578	0.9547	0.9501	0.8144	0.6572	0.3286	0.2397
CS1	1200	0.974	0.9585	0.9554	0.9509	0.8152	0.6579	0.3289	0.24
CS1	1220	0.9744	0.9591	0.9561	0.9516	0.8161	0.6586	0.3293	0.2402
CS1	1240	0.9748	0.9598	0.9568	0.9524	0.8169	0.6592	0.3296	0.2405
CS1	1260	0.9752	0.9604	0.9574	0.9531	0.8177	0.6599	0.3299	0.2407
CS1	1280	0.9756	0.961	0.9581	0.9538	0.8184	0.6605	0.3302	0.2409
CS1	1300	0.976	0.9615	0.9587	0.9545	0.8192	0.6611	0.3305	0.2412
CS1	1320	0.9763	0.9621	0.9593	0.9551	0.8199	0.6617	0.3308	0.2414
CS1	1340	0.9767	0.9626	0.9599	0.9558	0.8206	0.6622	0.3311	0.2416
CS1	1360	0.977	0.9632	0.9605	0.9564	0.8213	0.6628	0.3314	0.2418
CS1	1380	0.9773	0.9637	0.961	0.957	0.8219	0.6633	0.3317	0.242
CS1	1400	0.9777	0.9642	0.9615	0.9576	0.8226	0.6638	0.3319	0.2422
CS1	1420	0.978	0.9647	0.9621	0.9582	0.8232	0.6643	0.3322	0.2423
CS1	1440	0.9783	0.9651	0.9626	0.9587	0.8238	0.6648	0.3324	0.2425
CS1	1460	0.9786	0.9656	0.9631	0.9593	0.8244	0.6653	0.3326	0.2427
CS1	1480	0.9788	0.9661	0.9635	0.9598	0.825	0.6658	0.3329	0.2429
CS1	1500	0.9791	0.9665	0.964	0.9603	0.8255	0.6662	0.3331	0.243
CS1	1520	0.9794	0.9669	0.9645	0.9608	0.8261	0.6667	0.3333	0.2432
CS1	1540	0.9796	0.9673	0.9649	0.9613	0.8266	0.6671	0.3335	0.2434
CS1	1560	0.9799	0.9677	0.9653	0.9618	0.8271	0.6675	0.3338	0.2435

CS1	1580	0.9801	0.9681	0.9658	0.9622	0.8277	0.6679	0.334	0.2437
CS1	1600	0.9804	0.9685	0.9662	0.9627	0.8282	0.6683	0.3342	0.2438

Coding	PDU	TCP	IP	SNDP	LLC	RLC/MAC	GPRS	GPRS coded	GSM
CS2	1	0.0303	0.0189	0.0175	0.0159	0.0101	0.0091	0.0058	0.0043
CS2	20	0.3846	0.2778	0.2632	0.2439	0.202	0.1814	0.117	0.0853
CS2	40	0.5556	0.4348	0.4167	0.3922	0.303	0.2721	0.1754	0.128
CS2	60	0.6522	0.5357	0.5172	0.4918	0.3636	0.3265	0.2105	0.1536
CS2	80	0.7143	0.6061	0.5882	0.5634	0.4848	0.4354	0.2807	0.2048
CS2	100	0.7576	0.6579	0.641	0.6173	0.5051	0.4535	0.2924	0.2133
CS2	120	0.7895	0.6977	0.6818	0.6593	0.5195	0.4665	0.3008	0.2194
CS2	140	0.814	0.7292	0.7143	0.6931	0.6061	0.5442	0.3509	0.256
CS2	160	0.8333	0.7547	0.7407	0.7207	0.6061	0.5442	0.3509	0.256
CS2	180	0.8491	0.7759	0.7627	0.7438	0.6061	0.5442	0.3509	0.256
CS2	200	0.8621	0.7937	0.7813	0.7634	0.6734	0.6047	0.3899	0.2844
CS2	220	0.873	0.8088	0.7971	0.7801	0.6667	0.5986	0.386	0.2816
CS2	240	0.8824	0.8219	0.8108	0.7947	0.6612	0.5937	0.3828	0.2793
CS2	260	0.8904	0.8333	0.8228	0.8075	0.7163	0.6432	0.4147	0.3025
CS2	280	0.8974	0.8434	0.8333	0.8187	0.7071	0.6349	0.4094	0.2987
CS2	300	0.9036	0.8523	0.8427	0.8287	0.6993	0.6279	0.4049	0.2954
CS2	320	0.9091	0.8602	0.8511	0.8377	0.7459	0.6698	0.4318	0.3151
CS2	340	0.914	0.8673	0.8586	0.8458	0.7359	0.6608	0.4261	0.3109
CS2	360	0.9184	0.8738	0.8654	0.8531	0.7273	0.6531	0.4211	0.3072
CS2	380	0.9223	0.8796	0.8716	0.8597	0.7677	0.6893	0.4444	0.3243
CS2	400	0.9259	0.885	0.8772	0.8658	0.7576	0.6803	0.4386	0.32
CS2	420	0.9292	0.8898	0.8824	0.8714	0.7487	0.6723	0.4334	0.3162
CS2	440	0.9322	0.8943	0.8871	0.8765	0.7843	0.7043	0.4541	0.3313
CS2	460	0.935	0.8984	0.8915	0.8812	0.7744	0.6954	0.4483	0.3271
CS2	480	0.9375	0.9023	0.8955	0.8856	0.7656	0.6874	0.4432	0.3234
CS2	500	0.9398	0.9058	0.8993	0.8897	0.7974	0.7161	0.4617	0.3368
CS2	520	0.942	0.9091	0.9028	0.8935	0.7879	0.7075	0.4561	0.3328
CS2	540	0.9441	0.9122	0.906	0.897	0.7792	0.6997	0.4511	0.3291
CS2	560	0.9459	0.915	0.9091	0.9003	0.8081	0.7256	0.4678	0.3413
CS2	580	0.9477	0.9177	0.9119	0.9034	0.7989	0.7174	0.4625	0.3375
CS2	600	0.9494	0.9202	0.9146	0.9063	0.7905	0.7098	0.4577	0.3339
CS2	620	0.9509	0.9226	0.9172	0.9091	0.8169	0.7335	0.4729	0.345
CS2	640	0.9524	0.9249	0.9195	0.9117	0.8081	0.7256	0.4678	0.3413
CS2	660	0.9538	0.927	0.9218	0.9141	0.8	0.7184	0.4632	0.3379
CS2	680	0.9551	0.929	0.9239	0.9164	0.8242	0.7401	0.4772	0.3482
CS2	700	0.9563	0.9309	0.9259	0.9186	0.8159	0.7326	0.4723	0.3446
CS2	720	0.9574	0.9326	0.9278	0.9207	0.8081	0.7256	0.4678	0.3413
CS2	740	0.9585	0.9343	0.9296	0.9227	0.8305	0.7458	0.4808	0.3508
CS2	760	0.9596	0.936	0.9314	0.9246	0.8225	0.7386	0.4762	0.3474
CS2	780	0.9606	0.9375	0.933	0.9264	0.815	0.7319	0.4719	0.3443
CS2	800	0.9615	0.939	0.9346	0.9281	0.8359	0.7506	0.484	0.3531
CS2	820	0.9624	0.9404	0.9361	0.9297	0.8283	0.7438	0.4795	0.3499
CS2	840	0.9633	0.9417	0.9375	0.9313	0.8211	0.7373	0.4754	0.3468
CS2	860	0.9641	0.943	0.9389	0.9328	0.8407	0.7549	0.4867	0.3551
CS2	880	0.9649	0.9442	0.9402	0.9342	0.8333	0.7483	0.4825	0.352
CS2	900	0.9657	0.9454	0.9414	0.9356	0.8264	0.7421	0.4785	0.3491
CS2	920	0.9664	0.9465	0.9426	0.9369	0.8448	0.7586	0.4891	0.3568

CS2	940	0.9671	0.9476	0.9438	0.9381	0.8378	0.7523	0.485	0.3539
CS2	960	0.9677	0.9486	0.9449	0.9393	0.8312	0.7464	0.4812	0.3511
CS2	980	0.9684	0.9496	0.9459	0.9405	0.8485	0.7619	0.4912	0.3584
CS2	1000	0.969	0.9506	0.947	0.9416	0.8418	0.7559	0.4873	0.3556
CS2	1020	0.9696	0.9515	0.948	0.9427	0.8354	0.7501	0.4836	0.3529
CS2	1040	0.9701	0.9524	0.9489	0.9437	0.8518	0.7648	0.4931	0.3598
CS2	1060	0.9707	0.9532	0.9498	0.9447	0.8453	0.759	0.4894	0.3571
CS2	1080	0.9712	0.9541	0.9507	0.9457	0.8392	0.7535	0.4858	0.3545
CS2	1100	0.9717	0.9549	0.9516	0.9466	0.8547	0.7675	0.4948	0.361
CS2	1120	0.9722	0.9556	0.9524	0.9475	0.8485	0.7619	0.4912	0.3584
CS2	1140	0.9727	0.9564	0.9532	0.9484	0.8426	0.7566	0.4878	0.3559
CS2	1160	0.9732	0.9571	0.9539	0.9493	0.8574	0.7699	0.4964	0.3621
CS2	1180	0.9736	0.9578	0.9547	0.9501	0.8514	0.7645	0.4929	0.3596
CS2	1200	0.974	0.9585	0.9554	0.9509	0.8457	0.7594	0.4896	0.3572
CS2	1220	0.9744	0.9591	0.9561	0.9516	0.8598	0.772	0.4978	0.3632
CS2	1240	0.9748	0.9598	0.9568	0.9524	0.854	0.7669	0.4944	0.3607
CS2	1260	0.9752	0.9604	0.9574	0.9531	0.8485	0.7619	0.4912	0.3584
CS2	1280	0.9756	0.961	0.9581	0.9538	0.862	0.774	0.499	0.3641
CS2	1300	0.976	0.9615	0.9587	0.9545	0.8564	0.769	0.4958	0.3617
CS2	1320	0.9763	0.9621	0.9593	0.9551	0.8511	0.7642	0.4927	0.3595
CS2	1340	0.9767	0.9626	0.9599	0.9558	0.864	0.7758	0.5002	0.3649
CS2	1360	0.977	0.9632	0.9605	0.9564	0.8586	0.771	0.4971	0.3627
CS2	1380	0.9773	0.9637	0.961	0.957	0.8534	0.7663	0.4941	0.3605
CS2	1400	0.9777	0.9642	0.9615	0.9576	0.8658	0.7775	0.5013	0.3657
CS2	1420	0.978	0.9647	0.9621	0.9582	0.8606	0.7728	0.4982	0.3635
CS2	1440	0.9783	0.9651	0.9626	0.9587	0.8556	0.7683	0.4954	0.3614
CS2	1460	0.9786	0.9656	0.9631	0.9593	0.8675	0.779	0.5022	0.3664
CS2	1480	0.9788	0.9661	0.9635	0.9598	0.8625	0.7745	0.4993	0.3643
CS2	1500	0.9791	0.9665	0.964	0.9603	0.8576	0.7701	0.4965	0.3623
CS2	1520	0.9794	0.9669	0.9645	0.9608	0.8691	0.7804	0.5031	0.3671
CS2	1540	0.9796	0.9673	0.9649	0.9613	0.8642	0.776	0.5003	0.365
CS2	1560	0.9799	0.9677	0.9653	0.9618	0.8595	0.7718	0.4976	0.3631
CS2	1580	0.9801	0.9681	0.9658	0.9622	0.8705	0.7817	0.504	0.3677
CS2	1600	0.9804	0.9685	0.9662	0.9627	0.8658	0.7775	0.5013	0.3657

Coding	PDU	TCP	IP	SNDCP	LLC	RLC/MAC	GPRS	GPRS coded	GSM
Eficiencia									
CS3	1	0.0303	0.0189	0.0175	0.0159	0.0128	0.0118	0.0088	0.0064
CS3	20	0.3846	0.2778	0.2632	0.2439	0.1709	0.1578	0.117	0.0853
CS3	40	0.5556	0.4348	0.4167	0.3922	0.3419	0.3156	0.2339	0.1707
CS3	60	0.6522	0.5357	0.5172	0.4918	0.3846	0.355	0.2632	0.192
CS3	80	0.7143	0.6061	0.5882	0.5634	0.5128	0.4734	0.3509	0.256
CS3	100	0.7576	0.6579	0.641	0.6173	0.5128	0.4734	0.3509	0.256
CS3	120	0.7895	0.6977	0.6818	0.6593	0.5128	0.4734	0.3509	0.256
CS3	140	0.814	0.7292	0.7143	0.6931	0.5983	0.5523	0.4094	0.2987
CS3	160	0.8333	0.7547	0.7407	0.7207	0.5861	0.541	0.401	0.2926
CS3	180	0.8491	0.7759	0.7627	0.7438	0.6593	0.6086	0.4511	0.3291
CS3	200	0.8621	0.7937	0.7813	0.7634	0.641	0.5917	0.4386	0.32
CS3	220	0.873	0.8088	0.7971	0.7801	0.7051	0.6509	0.4825	0.352
CS3	240	0.8824	0.8219	0.8108	0.7947	0.6838	0.6312	0.4678	0.3413
CS3	260	0.8904	0.8333	0.8228	0.8075	0.7407	0.6838	0.5068	0.3698
CS3	280	0.8974	0.8434	0.8333	0.8187	0.7179	0.6627	0.4912	0.3584

CS3	300	0.9036	0.8523	0.8427	0.8287	0.6993	0.6455	0.4785	0.3491
CS3	320	0.9091	0.8602	0.8511	0.8377	0.7459	0.6885	0.5104	0.3724
CS3	340	0.914	0.8673	0.8586	0.8458	0.7265	0.6706	0.4971	0.3627
CS3	360	0.9184	0.8738	0.8654	0.8531	0.7692	0.7101	0.5263	0.384
CS3	380	0.9223	0.8796	0.8716	0.8597	0.7495	0.6919	0.5128	0.3742
CS3	400	0.9259	0.885	0.8772	0.8658	0.789	0.7283	0.5398	0.3938
CS3	420	0.9292	0.8898	0.8824	0.8714	0.7692	0.7101	0.5263	0.384
CS3	440	0.9322	0.8943	0.8871	0.8765	0.8059	0.7439	0.5514	0.4023
CS3	460	0.935	0.8984	0.8915	0.8812	0.7863	0.7258	0.538	0.3925
CS3	480	0.9375	0.9023	0.8955	0.8856	0.7692	0.7101	0.5263	0.384
CS3	500	0.9398	0.9058	0.8993	0.8897	0.8013	0.7396	0.5482	0.4
CS3	520	0.942	0.9091	0.9028	0.8935	0.7843	0.724	0.5366	0.3915
CS3	540	0.9441	0.9122	0.906	0.897	0.8145	0.7518	0.5573	0.4066
CS3	560	0.9459	0.915	0.9091	0.9003	0.7977	0.7364	0.5458	0.3982
CS3	580	0.9477	0.9177	0.9119	0.9034	0.8262	0.7627	0.5653	0.4124
CS3	600	0.9494	0.9202	0.9146	0.9063	0.8097	0.7474	0.554	0.4042
CS3	620	0.9509	0.9226	0.9172	0.9091	0.8367	0.7723	0.5725	0.4177
CS3	640	0.9524	0.9249	0.9195	0.9117	0.8205	0.7574	0.5614	0.4096
CS3	660	0.9538	0.927	0.9218	0.9141	0.8059	0.7439	0.5514	0.4023
CS3	680	0.9551	0.929	0.9239	0.9164	0.8303	0.7664	0.5681	0.4145
CS3	700	0.9563	0.9309	0.9259	0.9186	0.8159	0.7531	0.5582	0.4073
CS3	720	0.9574	0.9326	0.9278	0.9207	0.8392	0.7746	0.5742	0.4189
CS3	740	0.9585	0.9343	0.9296	0.9227	0.825	0.7615	0.5645	0.4118
CS3	760	0.9596	0.936	0.9314	0.9246	0.8473	0.7821	0.5797	0.423
CS3	780	0.9606	0.9375	0.933	0.9264	0.8333	0.7692	0.5702	0.416
CS3	800	0.9615	0.939	0.9346	0.9281	0.8547	0.789	0.5848	0.4267
CS3	820	0.9624	0.9404	0.9361	0.9297	0.841	0.7763	0.5754	0.4198
CS3	840	0.9633	0.9417	0.9375	0.9313	0.8284	0.7647	0.5668	0.4135
CS3	860	0.9641	0.943	0.9389	0.9328	0.8481	0.7829	0.5803	0.4234
CS3	880	0.9649	0.9442	0.9402	0.9342	0.8357	0.7714	0.5718	0.4172
CS3	900	0.9657	0.9454	0.9414	0.9356	0.8547	0.789	0.5848	0.4267
CS3	920	0.9664	0.9465	0.9426	0.9369	0.8425	0.7777	0.5764	0.4206
CS3	940	0.9671	0.9476	0.9438	0.9381	0.8608	0.7946	0.589	0.4297
CS3	960	0.9677	0.9486	0.9449	0.9393	0.8488	0.7835	0.5808	0.4237
CS3	980	0.9684	0.9496	0.9459	0.9405	0.8665	0.7998	0.5929	0.4326
CS3	1000	0.969	0.9506	0.947	0.9416	0.8547	0.789	0.5848	0.4267
CS3	1020	0.9696	0.9515	0.948	0.9427	0.8437	0.7788	0.5772	0.4212
CS3	1040	0.9701	0.9524	0.9489	0.9437	0.8602	0.794	0.5886	0.4294
CS3	1060	0.9707	0.9532	0.9498	0.9447	0.8494	0.784	0.5811	0.424
CS3	1080	0.9712	0.9541	0.9507	0.9457	0.8654	0.7988	0.5921	0.432
CS3	1100	0.9717	0.9549	0.9516	0.9466	0.8547	0.789	0.5848	0.4267
CS3	1120	0.9722	0.9556	0.9524	0.9475	0.8702	0.8033	0.5954	0.4344
CS3	1140	0.9727	0.9564	0.9532	0.9484	0.8597	0.7936	0.5882	0.4292
CS3	1160	0.9732	0.9571	0.9539	0.9493	0.8748	0.8075	0.5986	0.4367
CS3	1180	0.9736	0.9578	0.9547	0.9501	0.8645	0.798	0.5915	0.4315
CS3	1200	0.974	0.9585	0.9554	0.9509	0.8547	0.789	0.5848	0.4267
CS3	1220	0.9744	0.9591	0.9561	0.9516	0.8689	0.8021	0.5945	0.4338
CS3	1240	0.9748	0.9598	0.9568	0.9524	0.8593	0.7932	0.588	0.429
CS3	1260	0.9752	0.9604	0.9574	0.9531	0.8732	0.806	0.5974	0.4359
CS3	1280	0.9756	0.961	0.9581	0.9538	0.8637	0.7973	0.591	0.4312
CS3	1300	0.976	0.9615	0.9587	0.9545	0.8772	0.8097	0.6002	0.4379
CS3	1320	0.9763	0.9621	0.9593	0.9551	0.8679	0.8011	0.5938	0.4332
CS3	1340	0.9767	0.9626	0.9599	0.9558	0.881	0.8132	0.6028	0.4398
CS3	1360	0.977	0.9632	0.9605	0.9564	0.8718	0.8047	0.5965	0.4352

CS3	1380	0.9773	0.9637	0.961	0.957	0.863	0.7967	0.5905	0.4308
CS3	1400	0.9777	0.9642	0.9615	0.9576	0.8755	0.8082	0.5991	0.4371
CS3	1420	0.978	0.9647	0.9621	0.9582	0.8669	0.8002	0.5931	0.4328
CS3	1440	0.9783	0.9651	0.9626	0.9587	0.8791	0.8115	0.6015	0.4389
CS3	1460	0.9786	0.9656	0.9631	0.9593	0.8706	0.8036	0.5957	0.4346
CS3	1480	0.9788	0.9661	0.9635	0.9598	0.8825	0.8146	0.6038	0.4406
CS3	1500	0.9791	0.9665	0.964	0.9603	0.8741	0.8069	0.5981	0.4364
CS3	1520	0.9794	0.9669	0.9645	0.9608	0.8858	0.8176	0.6061	0.4422
CS3	1540	0.9796	0.9673	0.9649	0.9613	0.8775	0.81	0.6004	0.438
CS3	1560	0.9799	0.9677	0.9653	0.9618	0.8696	0.8027	0.595	0.4341
CS3	1580	0.9801	0.9681	0.9658	0.9622	0.8807	0.813	0.6026	0.4397
CS3	1600	0.9804	0.9685	0.9662	0.9627	0.8729	0.8057	0.5972	0.4357

Coding	PDU	TCP	IP	SNDCP	LLC	RLC/MAC	GPRS	GPRS coded	GSM
	Eficiencia								
CS4	1	0.0303	0.0189	0.0175	0.0159	0.0094	0.0088	0.0088	0.0064
CS4	20	0.3846	0.2778	0.2632	0.2439	0.1887	0.1754	0.1754	0.128
CS4	40	0.5556	0.4348	0.4167	0.3922	0.2516	0.2339	0.2339	0.1707
CS4	60	0.6522	0.5357	0.5172	0.4918	0.3774	0.3509	0.3509	0.256
CS4	80	0.7143	0.6061	0.5882	0.5634	0.5031	0.4678	0.4678	0.3413
CS4	100	0.7576	0.6579	0.641	0.6173	0.4717	0.4386	0.4386	0.32
CS4	120	0.7895	0.6977	0.6818	0.6593	0.566	0.5263	0.5263	0.384
CS4	140	0.814	0.7292	0.7143	0.6931	0.5283	0.4912	0.4912	0.3584
CS4	160	0.8333	0.7547	0.7407	0.7207	0.6038	0.5614	0.5614	0.4096
CS4	180	0.8491	0.7759	0.7627	0.7438	0.6792	0.6316	0.6316	0.4608
CS4	200	0.8621	0.7937	0.7813	0.7634	0.6289	0.5848	0.5848	0.4267
CS4	220	0.873	0.8088	0.7971	0.7801	0.6918	0.6433	0.6433	0.4693
CS4	240	0.8824	0.8219	0.8108	0.7947	0.6469	0.6015	0.6015	0.4389
CS4	260	0.8904	0.8333	0.8228	0.8075	0.7008	0.6516	0.6516	0.4754
CS4	280	0.8974	0.8434	0.8333	0.8187	0.7547	0.7018	0.7018	0.512
CS4	300	0.9036	0.8523	0.8427	0.8287	0.7075	0.6579	0.6579	0.48
CS4	320	0.9091	0.8602	0.8511	0.8377	0.7547	0.7018	0.7018	0.512
CS4	340	0.914	0.8673	0.8586	0.8458	0.7128	0.6628	0.6628	0.4836
CS4	360	0.9184	0.8738	0.8654	0.8531	0.7547	0.7018	0.7018	0.512
CS4	380	0.9223	0.8796	0.8716	0.8597	0.7966	0.7407	0.7407	0.5404
CS4	400	0.9259	0.885	0.8772	0.8658	0.7547	0.7018	0.7018	0.512
CS4	420	0.9292	0.8898	0.8824	0.8714	0.7925	0.7368	0.7368	0.5376
CS4	440	0.9322	0.8943	0.8871	0.8765	0.7547	0.7018	0.7018	0.512
CS4	460	0.935	0.8984	0.8915	0.8812	0.789	0.7337	0.7337	0.5353
CS4	480	0.9375	0.9023	0.8955	0.8856	0.8233	0.7656	0.7656	0.5585
CS4	500	0.9398	0.9058	0.8993	0.8897	0.7862	0.731	0.731	0.5333
CS4	520	0.942	0.9091	0.9028	0.8935	0.8176	0.7602	0.7602	0.5547
CS4	540	0.9441	0.9122	0.906	0.897	0.7837	0.7287	0.7287	0.5317
CS4	560	0.9459	0.915	0.9091	0.9003	0.8128	0.7557	0.7557	0.5514
CS4	580	0.9477	0.9177	0.9119	0.9034	0.8418	0.7827	0.7827	0.5711
CS4	600	0.9494	0.9202	0.9146	0.9063	0.8086	0.7519	0.7519	0.5486
CS4	620	0.9509	0.9226	0.9172	0.9091	0.8356	0.7769	0.7769	0.5669
CS4	640	0.9524	0.9249	0.9195	0.9117	0.805	0.7485	0.7485	0.5461
CS4	660	0.9538	0.927	0.9218	0.9141	0.8302	0.7719	0.7719	0.5632
CS4	680	0.9551	0.929	0.9239	0.9164	0.8553	0.7953	0.7953	0.5803
CS4	700	0.9563	0.9309	0.9259	0.9186	0.8255	0.7675	0.7675	0.56
CS4	720	0.9574	0.9326	0.9278	0.9207	0.8491	0.7895	0.7895	0.576
CS4	740	0.9585	0.9343	0.9296	0.9227	0.8213	0.7637	0.7637	0.5572

CS4	760	0.9596	0.936	0.9314	0.9246	0.8435	0.7843	0.7843	0.5722
CS4	780	0.9606	0.9375	0.933	0.9264	0.8657	0.805	0.805	0.5873
CS4	800	0.9615	0.939	0.9346	0.9281	0.8386	0.7797	0.7797	0.5689
CS4	820	0.9624	0.9404	0.9361	0.9297	0.8595	0.7992	0.7992	0.5831
CS4	840	0.9633	0.9417	0.9375	0.9313	0.8342	0.7756	0.7756	0.5659
CS4	860	0.9641	0.943	0.9389	0.9328	0.854	0.7941	0.7941	0.5794
CS4	880	0.9649	0.9442	0.9402	0.9342	0.8739	0.8126	0.8126	0.5928
CS4	900	0.9657	0.9454	0.9414	0.9356	0.8491	0.7895	0.7895	0.576
CS4	920	0.9664	0.9465	0.9426	0.9369	0.8679	0.807	0.807	0.5888
CS4	940	0.9671	0.9476	0.9438	0.9381	0.8446	0.7853	0.7853	0.573
CS4	960	0.9677	0.9486	0.9449	0.9393	0.8625	0.802	0.802	0.5851
CS4	980	0.9684	0.9496	0.9459	0.9405	0.8805	0.8187	0.8187	0.5973
CS4	1000	0.969	0.9506	0.947	0.9416	0.8576	0.7974	0.7974	0.5818
CS4	1020	0.9696	0.9515	0.948	0.9427	0.8748	0.8134	0.8134	0.5935
CS4	1040	0.9701	0.9524	0.9489	0.9437	0.8532	0.7933	0.7933	0.5788
CS4	1060	0.9707	0.9532	0.9498	0.9447	0.8696	0.8085	0.8085	0.5899
CS4	1080	0.9712	0.9541	0.9507	0.9457	0.886	0.8238	0.8238	0.601
CS4	1100	0.9717	0.9549	0.9516	0.9466	0.8648	0.8041	0.8041	0.5867
CS4	1120	0.9722	0.9556	0.9524	0.9475	0.8805	0.8187	0.8187	0.5973
CS4	1140	0.9727	0.9564	0.9532	0.9484	0.8604	0.8	0.8	0.5837
CS4	1160	0.9732	0.9571	0.9539	0.9493	0.8755	0.814	0.814	0.5939
CS4	1180	0.9736	0.9578	0.9547	0.9501	0.8906	0.8281	0.8281	0.6042
CS4	1200	0.974	0.9585	0.9554	0.9509	0.8708	0.8097	0.8097	0.5908
CS4	1220	0.9744	0.9591	0.9561	0.9516	0.8853	0.8232	0.8232	0.6006
CS4	1240	0.9748	0.9598	0.9568	0.9524	0.8665	0.8057	0.8057	0.5879
CS4	1260	0.9752	0.9604	0.9574	0.9531	0.8805	0.8187	0.8187	0.5973
CS4	1280	0.9756	0.961	0.9581	0.9538	0.8945	0.8317	0.8317	0.6068
CS4	1300	0.976	0.9615	0.9587	0.9545	0.876	0.8145	0.8145	0.5943
CS4	1320	0.9763	0.9621	0.9593	0.9551	0.8895	0.8271	0.8271	0.6034
CS4	1340	0.9767	0.9626	0.9599	0.9558	0.8718	0.8106	0.8106	0.5914
CS4	1360	0.977	0.9632	0.9605	0.9564	0.8848	0.8227	0.8227	0.6003
CS4	1380	0.9773	0.9637	0.961	0.957	0.8979	0.8348	0.8348	0.6091
CS4	1400	0.9777	0.9642	0.9615	0.9576	0.8805	0.8187	0.8187	0.5973
CS4	1420	0.978	0.9647	0.9621	0.9582	0.8931	0.8304	0.8304	0.6059
CS4	1440	0.9783	0.9651	0.9626	0.9587	0.8764	0.8149	0.8149	0.5946
CS4	1460	0.9786	0.9656	0.9631	0.9593	0.8886	0.8263	0.8263	0.6028
CS4	1480	0.9788	0.9661	0.9635	0.9598	0.9008	0.8376	0.8376	0.6111
CS4	1500	0.9791	0.9665	0.964	0.9603	0.8844	0.8224	0.8224	0.6
CS4	1520	0.9794	0.9669	0.9645	0.9608	0.8962	0.8333	0.8333	0.608
CS4	1540	0.9796	0.9673	0.9649	0.9613	0.8805	0.8187	0.8187	0.5973
CS4	1560	0.9799	0.9677	0.9653	0.9618	0.8919	0.8293	0.8293	0.6051
CS4	1580	0.9801	0.9681	0.9658	0.9622	0.9034	0.84	0.84	0.6128
CS4	1600	0.9804	0.9685	0.9662	0.9627	0.8879	0.8256	0.8256	0.6024