



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**MODELO DE CALIDAD DE SERVICIO PARA UNA RED DE DATOS  
HSDPA (HIGH SPEED DOWNLINK PACKET ACCESS) PARA EL  
ENTORNO LOCAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
ELECTRICISTA

SAMUEL IGNACIO RODRÍGUEZ CARDEMIL

PROFESOR GUÍA:  
NICOLÁS BELTRÁN MATURANA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
NÉSTOR BECERRA YOMA  
GONZALO VEAS CASTILLO

SANTIAGO DE CHILE  
ABRIL 2009



RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA  
POR: SAMUEL RODRÍGUEZ C.  
FECHA: ABRIL 2009  
PROF. GUÍA: Sr. NICOLÁS BELTRÁN

## **MODELO DE CALIDAD DE SERVICIO PARA UNA RED DE DATOS HSDPA (HIGH SPEED DOWNLINK PACKET ACCESS) PARA EL ENTORNO LOCAL**

Mantener la calidad de servicio al usuario de una red de comunicaciones móviles de tercera generación, impone desafíos en la planificación de la etapa de acceso de red y de conmutación de paquetes. La información disponible corresponde a estadísticas de cada elemento de red y no del sistema completo (*end to end*) para conocer como el usuario percibe el servicio entregado en especial cuando existen problemas en el acceso en la interfaz inalámbrica.

El objetivo general de esta memoria de título es diseñar e implementar un modelo de calidad de servicio para una red de datos HSDPA para el entorno local. El diseño realizado está basado en Redes Bayesianas dada la naturaleza probabilística de las variables consideradas, permitiendo al modelo implementado, estimar el throughput de un usuario de la red. El *throughput* es un parámetro particular de calidad de servicio y que se utiliza para caracterizar la velocidad con que el usuario recibe y envía datos desde y hacia la red.

El modelo diseñado está basado en la arquitectura, componentes y funcionamiento de un sistema HSPA *Release 5*, que está operativa en la red de datos móviles de Entel PCS Telecomunicaciones S.A. La metodología se basa en un enfoque *bottom-up*, partiendo desde el nivel más bajo de la arquitectura de capas y considerando la degradación acumulada del desempeño debida a los efectos introducidos por las diferentes capas y sus interacciones.

El modelo fue aplicado a un escenario real correspondiente a una zona de la ciudad de Santiago definida por el operador y sus resultados fueron comparados mediante un test de hipótesis con mediciones de red. El indicador de calidad de servicio para el caso de transferencia de archivos entregado por el modelo difiere del obtenido con las mediciones en un 5%, demostrando que el diseño realizado es satisfactorio para las necesidades del operador.

Se concluye que el modelo diseñado es promisorio para estimar con exactitud el *throughput* que recibirá el usuario al conocer las características de la red, permitiendo al operador caracterizar la calidad de servicio, realizar una adecuada planificación de la red de datos y hacer un uso más eficiente de los recursos.

# Agradecimientos

Primero que nada quiero agradecer y dedicar esta memoria a toda mi familia. A mis padres, Juan Ignacio y Javiera, doy gracias por tenerlos ya que siempre han estado a mi lado y formaron a la persona que soy. A mis hermanos Javiera e Ignacio, que son los mejores hermanos que uno podría pedir y que claramente son mucho mejor que yo en todo sentido, ojalá que yo haya sido un buen hermano para ustedes. A mi Orión. A mis abuelos Nene, Ema, Nelson y Mariela, que han sido muy importantes en mi persona y que no sabría que hacer sin ellos.

Por supuesto también quiero agradecer a todo el resto de mi familia. A mis tíos, primos, sobrinos y a Delfina. Ojalá que mi familia siempre esté unida y que nos sigamos juntando hasta cuando seamos viejos.

También les dedico esta memoria a mis amigos más cercanos y a los que no he visto hace tiempo. En especial (el orden no representa el cariño), a mis queridos amigos que sigo teniendo del colegio que se reflejan en *Punga*, a mis amigos los *Tigres* con los cuales he tenido muy buenos momentos y a mis grandes amigos de Eléctrica que espero seguir viendo por mucho tiempo más, a Lucila, Martina y Loreto.

Quiero agradecer a toda la gente que ha estado junto a mí en los momentos difíciles, en especial cuando tuve mi accidente al inicio de esta memoria. Ellos hicieron que ésta haya sido la experiencia que nunca voy a olvidar, más que nada porque fue cuando realmente me di cuenta del cariño. Ellos saben quienes son, no necesito recordárselos ya que están en mi corazón. De este periodo quiero agradecer en especial a toda mi familia, a Belisario, a mi equipo de fútbol de Ingeniería y a Constanza. Perdonen por hacerlos sufrir tanto.

Relacionado con el desarrollo de esta memoria quiero agradecer a Entel PCS por ofrecerme esta oportunidad, a todas las personas de la empresa que me ayudaron y enseñaron. En especial quiero agradecer a Claudio y Gonzalo, los cuales fueron los mejores apoyos en todo sentido. Quiero agradecer a mi profesor guía Nicolás por creer en mi y ayudarme en todo, lo considero una gran persona. Gracias a mi viejo, a mi hermana, a Andrés y a la Sofi, pusieron un granito muy importante y que valoro mucho en mi memoria.

Gracias a todos y espero que sigan siendo parte de mi vida...Samuel

# Tabla de contenidos

Tabla de contenidos .....	v
Índice de Tablas .....	viii
Índice de Ilustraciones.....	ix
Capítulo 1 .....	1
Introducción .....	1
1.1 Motivación .....	1
1.2 Alcance.....	2
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivos Generales.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Estructura del trabajo y metodología .....	3
Capítulo 2 .....	5
Sistemas de Telefonía Móvil .....	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 Evolución de la telefonía celular.....	5
2.2.1 GSM.....	7
2.2.2 GPRS.....	10
2.2.3 EDGE.....	12
2.3 UMTS .....	14
2.3.1 Arquitectura de UMTS (funcionalidad básica de los nodos).....	14
2.3.1.1 Red de acceso (UTRAN) .....	14
2.3.1.2 Core Network .....	15
2.3.2 HSPA (HSDPA/HSUPA) .....	16
2.3.2.1 HSDPA.....	17
2.3.2.2 HSUPA.....	20
2.3.2.3 <i>Handover</i> .....	22
2.4 Clases de tráfico y Calidad de Servicio en Aplicaciones .....	23
2.4.1 Calidad de servicio en UMTS (arquitectura de QoS en UMTS) .....	27
2.4.2 Estado del Arte de la calidad de servicio .....	28

2.4.3	Perspectiva usuario final .....	28
2.4.4	Perspectiva del operador de red .....	29
2.5	Evolución .....	30
2.5.1	IP Release 6.....	30
2.5.2	LTE .....	31
Capítulo 3	.....	33
Modelo de Calidad de Servicio para una red de datos HSDPA	.....	33
3.1	Introducción.....	33
3.2	Marco Metodológico e Hipótesis de Trabajo .....	34
3.2.1	Diseño .....	34
3.3	Modelo Probabilístico .....	35
3.3.1	Introducción.....	35
3.3.2	Redes Bayesianas .....	35
3.3.3	Trasfondo Matemático [14] .....	37
3.4	Modelo de Calidad de Servicio .....	38
3.4.1	Introducción.....	38
3.4.2	Análisis de desempeño del usuario final .....	39
3.4.3	Factores generales de rendimiento para HSDPA .....	58
3.5	Modelo implementado .....	58
3.6	Indicador de calidad de servicio FTP .....	61
3.6.1	Metodología para la definición de indicadores de desempeño (KPI) .....	61
3.6.1.1	Definición y Medición de KPI de usuario final .....	63
3.6.1.2	Metodología de valoración de KPI .....	64
3.6.1.3	Definición KPI de Red.....	65
3.6.1.4	Obtención SQI para FTP .....	67
Capítulo 4	.....	70
Resultados, Análisis y Discusión	.....	70
4.1	Modelamiento de estados de los elementos relevantes de Red .....	70
4.1.1	Mediciones en Terreno .....	71
4.1.1.1	Definición de áreas de prueba .....	71
4.1.1.2	Análisis de cobertura .....	72
4.1.1.3	Metodologías de recolección de datos para servicio FTP .....	72
4.1.2	Mediciones <i>throughput</i> final en Laboratorio .....	73
4.1.2.1	Definición de área de prueba .....	73
4.1.2.2	Metodologías de recolección de datos para servicio FTP .....	73
4.1.2.3	Resultado de las mediciones .....	75

4.1.3 Mediciones <i>throughput</i> final en condiciones normales.....	77
4.1.3.1 Resultado de las mediciones .....	77
4.1.4 Mediciones <i>throughput</i> final variando la calidad de señal.....	79
4.1.4.1 Resultado de las mediciones .....	79
4.2 Resultado y Validación del Modelo .....	80
4.2.1 Análisis de pruebas.....	80
4.2.1.1 Comparación pruebas del laboratorio con el modelo.....	80
4.2.1.2 Comparación pruebas en un entorno normal.....	81
4.2.1.3 Comparación pruebas variando la calidad del canal.....	82
4.2.2. Validación Modelo.....	83
4.2.2.1. Resultados Test de Hipótesis .....	85
Capítulo 5.....	89
Conclusiones.....	89
Referencias .....	92
Apéndice A.....	95
Lista de Acrónimos.....	95
Apéndice B.....	98
Arquitectura de pruebas 1 .....	98
Apéndice C.....	99
Accesibilidad HSDPA.....	99
Apéndice D.....	100
Intervalo de los valores de los Parámetros .....	100

# Índice de Tablas

Tabla 1 Esquemas de codificación de EDGE.....	13
Tabla 2 Estrategias de <i>scheduling</i> .....	19
Tabla 3 Categoría de terminales con HSDPA .....	20
Tabla 4 Categoría de terminales con HSUPA .....	22
Tabla 5 Clases de servicios.....	24
Tabla 6 Valores principales para el soporte de distintos tipos de servicios .....	26
Tabla 7 Tasas de transferencias en LTE .....	32
Tabla 8 Protocolo FTP .....	43
Tabla 9 Tasas teóricas de bit con 15 multicódigos para diferentes TFRCs.....	49
Tabla 10 Tasas de data a nivel del RLC para diferentes categorías de usuario y con tamaño de PDU de 320 bit .....	50
Tabla 11 Características de redes e impacto en TCP .....	57
Tabla 12 KPIs usuario final para servicios FTP .....	64
Tabla 13 Tipos de errores en los test de hipótesis .....	84
Tabla 14 Validación Round Robin para 1 y 2 usuarios.....	85
Tabla 15 Validación para Round Robin para 3 y 4 usuarios .....	86
Tabla 16 Validación para Proportional Fair para 1 y 2 usuarios .....	86
Tabla 17 Validación para 3 y 4 usuarios .....	87
Tabla 18 Validación para diferentes calidades del canal.....	87
Tabla 19 Porcentaje de accesibilidad para HSDPA .....	99
Tabla 20 Intervalo de valores para nodo RSCP [25] .....	100
Tabla 21 Intervalo de valores para $E_c/N_0$ [25] .....	100
Tabla 22 Intervalo de valores para CQI [26].....	100



# Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Evolución de estándares de 2G a 4G .....	6
Ilustración 2 Capacidades de las distintas tecnologías inalámbricas .....	7
Ilustración 3 Estructura FDMA y TDMA en GSM.....	8
Ilustración 4 Composición de un TRX .....	8
Ilustración 5 Arquitectura básica GSM .....	9
Ilustración 6 Arquitectura del sistema GPRS.....	11
Ilustración 7 Diagrama de constelación de modulación 8-PSK .....	13
Ilustración 8 Arquitectura genérica de UMTS .....	14
Ilustración 9 Arquitectura UTRAN .....	15
Ilustración 10 Arquitectura básica del Núcleo de Red .....	16
Ilustración 11 Ejemplo de canales de bajada de alta velocidad .....	17
Ilustración 12 Ejemplo de <i>scheduling</i> .....	18
Ilustración 13 Requerimientos de velocidades para distintos tipos de servicios.....	25
Ilustración 14 Arquitectura de QoS en UMTS.....	27
Ilustración 15 Definiciones de tasa de bit end to end .....	29
Ilustración 16 Potencial de HSPA.....	30
Ilustración 17 Red Bayesiana.....	37
Ilustración 18 Vista del tubo de transmisión IP .....	40
Ilustración 19 Performance del servicio.....	41
Ilustración 20 Efecto partida lenta TCP (slow start) medido en las pruebas .....	42
Ilustración 21 Diagrama servicio FTP.....	43
Ilustración 22 Fuentes de degradación del Throughput del usuario final .....	44
Ilustración 23 Capas que afectan el rendimiento del usuario final.....	45
Ilustración 24 Red bayesiana primaria para obtener el throughput del usuario.....	45
Ilustración 25 Tres diferentes estados de una conexión TCP/IP y la correspondiente tasa de bits.....	47
Ilustración 26 Diagrama efectos en el enlace de datos .....	48
Ilustración 27 Carga útil de datos de MAC-hs .....	49
Ilustración 28 Diagramas de constelación para QPSK y 16QAM.....	50
Ilustración 29 Flexibilidad de la tasa de bits. ....	52
Ilustración 30 Multiplexación de servicios de distintas tasas de bits. ....	52
Ilustración 31 Diagrama de variables que afectan el desempeño de las capas superiores .....	55
Ilustración 32 Evolución estimada del Round Trip Time (RTT). ....	56
Ilustración 33 Diagrama Modelo de calidad de Servicio .....	59
Ilustración 34 Modelo de Calidad de servicio para una red de datos HSDPA.....	60
Ilustración 35 Cadena de procesos para el desarrollo de una red .....	61
Ilustración 36 Modelo de sesión para un servicio genérico .....	62
Ilustración 37 Modelo de sesión FTP .....	64
Ilustración 38 Peso de los KPIs de importancia para FTP .....	65
Ilustración 39 Tipos de respuesta a un mensaje de requerimiento de atachamiento .....	66

Ilustración 40	Respuestas a un requerimiento de activación de PDP .....	67
Ilustración 41	Red Bayesiana FTP SQI .....	68
Ilustración 42	Modelo para predecir el Indicador de Calidad de Servicio FTP .....	69
Ilustración 43	Arquitectura de prueba.....	74
Ilustración 44	Diagrama de bloques de la metodología de las mediciones .....	75
Ilustración 45	Tiempo de descarga con la variación de usuarios y tamaño del archivo .	75
Ilustración 46	Throughput recibido por el usuario fina.....	76
Ilustración 47	Porcentaje de Degradación del Throughput Máximo variando el numero de usuarios y el tamaño del archivo .....	76
Ilustración 48	Tiempo de descarga variando el número de usuarios y el tamaño de archivo.....	78
Ilustración 49	Throughput recibido por el usuario final. ....	78
Ilustración 50	Efecto de degradación del throughput de un elemento de red.....	79
Ilustración 51	Throughput usuario final variando la calidad del canal .....	80
Ilustración 52	Comparación pruebas en el laboratorio con modelo implementado .....	81
Ilustración 53	Comparación modelo con mediciones en una celda tipo .....	82
Ilustración 54	Comparación modelo con mediciones variando la calidad del canal .....	83
Ilustración 55	Arquitectura de Pruebas .....	98

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Motivación

UMTS (*Universal Mobile Telecommunications Systems*) representa la evolución de las comunicaciones móviles de los sistemas de segunda generación. Esta tecnología posee la característica de ofrecer una amplia gama de aplicaciones multimedia, lo que conlleva a múltiples clases de tráfico con diferentes requisitos de calidad de servicio, influyendo en el diseño e implementación de la red de comunicaciones y en los mecanismos de control de calidad. Con la incorporación de la tecnología HSPA (*High Speed Packet Access*) a UMTS, la variedad de servicios que es posible ofrecer aumentó aún más, debido principalmente a la gran velocidad de transferencias de datos.

HSPA permite al operador un mejor desempeño de su red y al usuario final mejorar la calidad de servicio recibida. Con este sistema se mejora potencialmente las velocidades del servicio entregado. Con esta tecnología se pueden aumentar considerablemente los alcances del sistema en velocidad de bajada y subida de datos, reducir pérdidas, mejorar el acceso a la web, voz sobre IP (VoIP) y servicios de *streaming*.

Sin embargo, debido a la complejidad de implementar la tecnología de tercera generación 3G sobre los actuales sistemas 2G, no son pocos los detalles que faltan por resolver con profundidad. Principalmente el problema de soportar eficientemente las múltiples aplicaciones con los requisitos de Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) que exige cada una de ellas, planteándose constantemente la necesidad de obtener un uso eficiente de los recursos de red que son limitados. Por lo tanto, es necesario para el operador poder caracterizar la calidad y comportamiento de la red, para hacer un uso eficiente de sus redes con una utilización efectiva de sus recursos y una planificación adecuada.

## 1.2 Alcance

Esta memoria está enfocada en el estudio de la red de datos móviles de Entel PCS Telecomunicaciones S.A., operadora de telefonía móvil que hace uso de la tecnología UMTS desde Diciembre del 2006.

El objetivo de mantener la calidad de servicio al usuario, impone desafíos en la planificación de la etapa de acceso de red y de conmutación de paquetes (*core data network*). La información disponible, corresponde a estadísticas de cada elemento de red, sin contar con información del sistema completo (*end to end*), la cual es vital para conocer como el usuario percibe el servicio entregado en especial cuando existen problemas en el acceso en la interfaz inalámbrica.

El objetivo principal de este trabajo es la elaboración de un modelo que permita determinar un parámetro particular de calidad de servicio entregado al usuario final, en el ámbito de las telecomunicaciones móviles y sea, por lo tanto, de apoyo al proceso de planificación de estas redes. Además al determinar este parámetro es posible determinar el nivel de calidad de servicio entregado por el operador.

El parámetro bajo análisis será el *throughput* que obtiene el usuario al acceder a la red de datos HSDPA de Entel PCS. *Throughput* es la cantidad de data transferida en una dirección, sobre un enlace, dividida por el tiempo que ésta demora en llegar a destino, expresada en bits o bytes por segundo.

El modelo propuesto es un **modelo probabilístico** que toma en consideración las características principales que se tienen en un escenario básico para un usuario (principalmente la red de acceso, el terminal del usuario, núcleo de red, internet, etc.). En particular el modelo está basado en Redes Bayesianas para la red Ericsson de Entel, para lo cual se desarrolla una metodología para que el modelo sea representativo a la realidad, explicando cada una de sus componentes.

Para trabajar con el modelo se desarrolla una interfaz gráfica pudiendo manejar y simular los valores de los principales parámetros, pudiendo obtener el *throughput* que recibirá el usuario considerando las características del ambiente en que se encuentra, además del nivel de calidad de servicio entregado por el operador. Los valores de los parámetros del modelo se obtendrán de bases de datos, *softwares* que la empresa ocupa para monitorear el desempeño de la red, conocimiento teórico y pruebas realizadas en laboratorio y en terreno.

## **1.3 Objetivos**

Los objetivos generales y específicos de este trabajo se plantean a continuación.

### **1.3.1 Objetivos Generales**

- 1) Entender el funcionamiento de una red de datos HSDPA, identificando sus componentes, interfaces y factores principales que afectan su comportamiento.
- 2) Realizar un modelo que permita predecir el nivel de servicio, como percepción de usuario.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- 1) Estudio de la red HSDPA y de las normas ITU-T, 3GPP y ETSI asociadas.
- 2) Realizar un modelo que permita obtener un parámetro particular de calidad de servicio.
- 3) Mediciones en terreno y en condiciones ideales en laboratorio para modelar la red UTRAN en un escenario básico de una celda.
- 4) Mediciones en la Red de transporte IP y de interconexión entre nodos de datos.
- 5) Validar el modelo tomando como referencia el desempeño de la red HSDPA de Entel PCS.
- 6) Estudio de los modelos probabilísticos basados en Redes Bayesianas para la implementación de modelo de calidad de servicio.

## **1.4 Estructura del trabajo y metodología**

El trabajo desarrollado en Entel PCS, para poder obtener un modelo de un parámetro particular de calidad de servicio aplicado a la red HSDPA que tiene desplegada en Santiago está dividido en 5 capítulos.

En el Capítulo 2 se entregan los conocimientos básicos para poder entender la evolución que han presentado las comunicaciones móviles. Se explica la estructura básica de los sistemas de tercera generación lo que permite entender la entrega de servicios a través de este sistema. Se presenta una introducción a las posibles evoluciones que experimentarán estas tecnologías en el futuro.

En el Capítulo 3 se desarrolla el modelo de calidad de servicio. Se explica la metodología de investigación que se lleva a cabo para validar el modelo. Se muestra la técnica para modelar el sistema, estudiando el modelo planteado como un modelo probabilístico debido a sus ventajas y a que es una buena forma de caracterizar una red de telecomunicaciones. Para validar este modelo se entregan los fundamentos básicos en los cuales se basa el modelo. A continuación se explican la metodología para modelar el sistema, las razones de las elecciones hechas en la aproximación de los factores que componen el modelo, ya sean parámetros, indicadores, elementos o interfaces, que tendrán una mayor o menor relevancia al obtener el indicador final. Se plantea una utilidad directa del modelo además del objetivo específico además de plantear posibles desarrollos y proyectos a futuro

En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos, además de las comparaciones entre distintos escenarios. Además se realiza un estudio estadístico para validar el modelo, comparando los resultados obtenidos por el modelo con las mediciones hechas.

Por último, el Capítulo 5 reúne las conclusiones que se obtuvieron en el transcurso del trabajo, verificando el cumplimiento de los objetivos generales y específicos. Se indican las ventajas y desventajas del modelo propuesto. Se incluyen además las referencias, un glosario y los anexos respectivos.

# Capítulo 2

## Sistemas de Telefonía Móvil

### 2.1 Introducción

En esta sección primero se hará una breve reseña de la evolución que ha tenido la telefonía celular y luego se describirá la arquitectura básica y características principales de los nodos que componen la tecnología UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), siguiendo el *Release '99* y la evolución para *Release 5* con HSPA.

### 2.2 Evolución de la telefonía celular

La telefonía celular ha sufrido una rápida y creciente evolución desde sus inicios. Para poder diferenciar los cambios más radicales que ha experimentado, se la divide en generaciones, las cuales van a depender del nivel de desarrollo de las tecnologías, sus respectivas capacidades y el año en que se desarrollaron.

Los primeros sistemas móviles que surgieron fueron llamados de Primera Generación (1G), durante los años 80, caracterizándose por estar basados en tecnología analógica, uno de los más conocidos fue AMPS (*American Mobile Phone System*), que entregaba sólo servicios de voz. En ese momento cada país desarrolló redes nacionales, limitando el uso del terminal al interior de sus fronteras nacionales, lo que limitó las posibilidades de los usuarios de hacer uso de redes al visitar otros países.

En los años 90 surgieron los sistemas de Segunda Generación (2G). Los dispositivos 2G se basaron en tecnología digital, a diferencia de la analógica de los de Primera Generación. Estos sistemas aún se utilizan en la actualidad, donde se pueden encontrar las tecnologías GSM, CDMA One, TDMA y PDC. Los sistemas 2G proveen servicio de voz y un limitado servicio de datos, mensajería de texto SMS, fax y datos a 9,6 kbps, entre otros.

La continuación cronológica fue llamada Generación 2.5 (2.5G) con la tecnología GPRS, permitiendo velocidades de que van desde los 56 a 114 kbps y representó un punto de cruce con los sistemas de Tercera Generación (3G).

Las tecnologías de 2.75G como EDGE y EGPRS superaron en capacidades a los sistemas 2.5, permitiendo alcanzar velocidades hasta 384 kbps de transmisión de información para servicios de datos, permitiendo la entrega de servicios como mensajería multimedia (MMS), FTP, navegación Web y WAP, entre otros.

Al aparecer los sistemas de Tercera Generación (3G), se hizo evidente la convergencia de las redes de comunicaciones de voz con las de datos. Esta generación permitió a los usuarios tener un acceso inalámbrico de mayor capacidad con una determinada calidad de servicio, permitiendo toda una gama de servicios que no era posible obtener con las generaciones anteriores. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) reconoce como tecnología 3G a los sistemas de UMTS, CDMA2000, IMT-2000 y ARIB entre otras. [18]

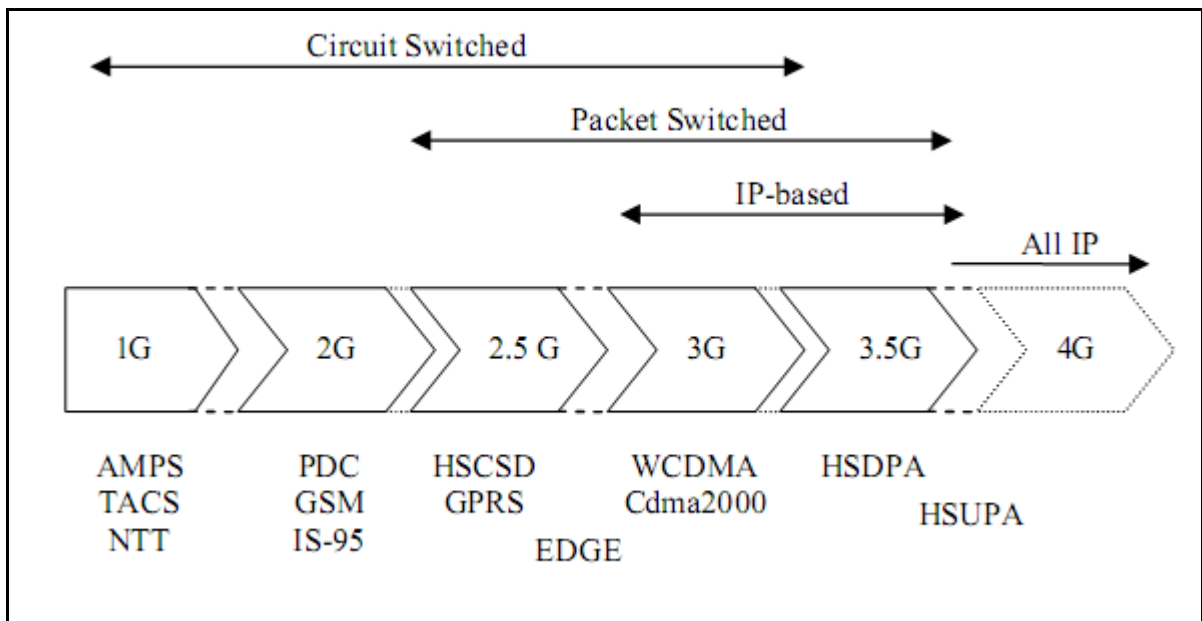


Ilustración 1 Evolución de estándares de 2G a 4G



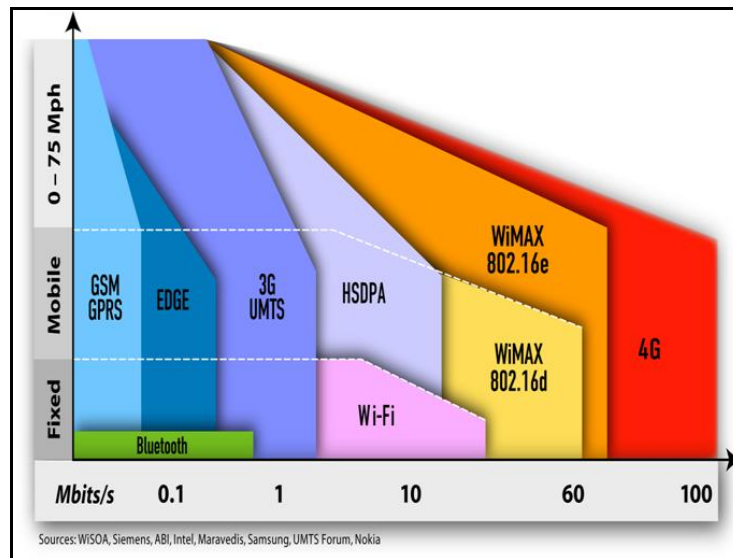


Ilustración 2 Capacidades de las distintas tecnologías inalámbricas

A continuación se hará un pequeño resumen de las principales tecnologías celulares.

### 2.2.1 GSM

Es un sistema de telefonía móvil digital 2G, estandarizado por ETSI, creado para reemplazar a la telefonía analógica. GSM define una red telefónica móvil terrestre (PLMN) que comprende al acceso de radio con estructura celular (en base a celdas y sectores, como unidad básica de división territorial), transmisión, conmutación y señalización; que permiten soportar funciones de movilidad y de seguridad para el establecimiento de las llamadas de voz y de la información enviada.

La tecnología GSM está basada en un sistema multi-portadora, de acceso múltiple por división en el tiempo (TDMA) y de acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA). La portadora FDMA tiene un ancho de banda de 200 kHz, sobre la cual se aplica TDMA. Un *frame* TDMA dura aproximadamente 4,615 ms y posee 8 ranuras de tiempo (TSL, Time Slots) los cuales tienen una duración de aproximadamente 577  $\mu$ s. En la ilustración 3 se puede ver la estructura TDMA y FDMA.

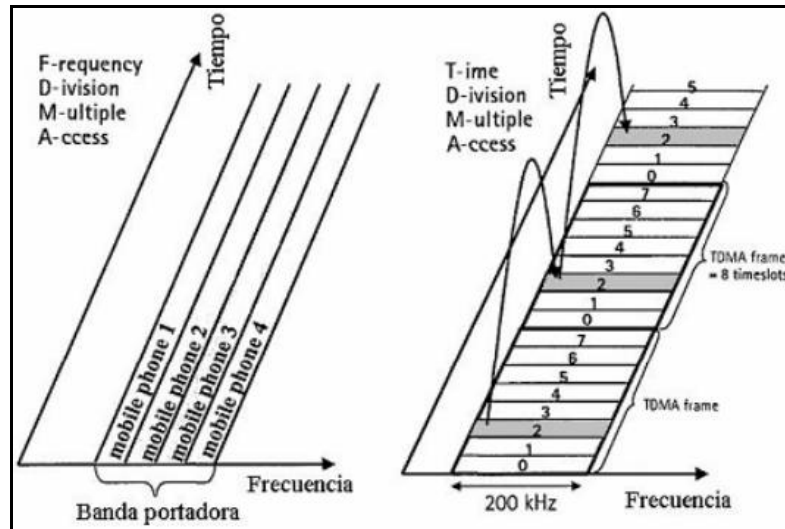


Ilustración 3 Estructura FDMA y TDMA en GSM

Los sistemas GSM utilizan principalmente las bandas de frecuencias de 850, 900, 1800 y 1900 MHz, las cuales por estándar se dividen en frecuencias para el enlace de subida o de transmisión (UL) y para bajada o de recepción (DL), con una separación de 45 u 80 MHz entre éstas. Un par de frecuencias UL y DL forman un trans-receptor (TRX) y sobre éste se definen 8 RTSLs (radio TSLs), que corresponden a la unión de los TSLs del *frame* TDMA de la frecuencia UL con los TSLs del *frame* TDMA de la frecuencia DL.

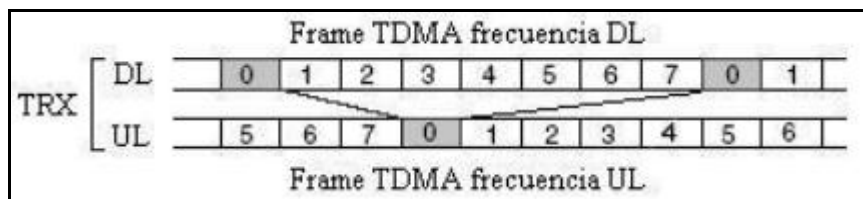


Ilustración 4 Composición de un TRX

Los sistemas GSM de banda de frecuencias de 900 y 1800 MHz son ocupados en Europa, la mayor parte de Asia y en América de Sur, en cambio en América del Norte y en algunas partes de Asia y América de Sur se usa las bandas 850 y 1900 MHz.

### 2.2.1.1 Arquitectura de una red GSM

El sistema GSM está dividido en 4 unidades principales: la estación móvil (MS), el subsistema de estación base (BSS), el subsistema de conmutación de red (NSS) y el

subsistema de administración y gestión de red (NMS). El NMS es un sistema de soporte, cuya función es ayudar a la configuración de la red y gestión de ésta. El BSS y el NSS se encargan de la transmisión y la conmutación de las conexiones. La arquitectura básica se ve en la ilustración 5.

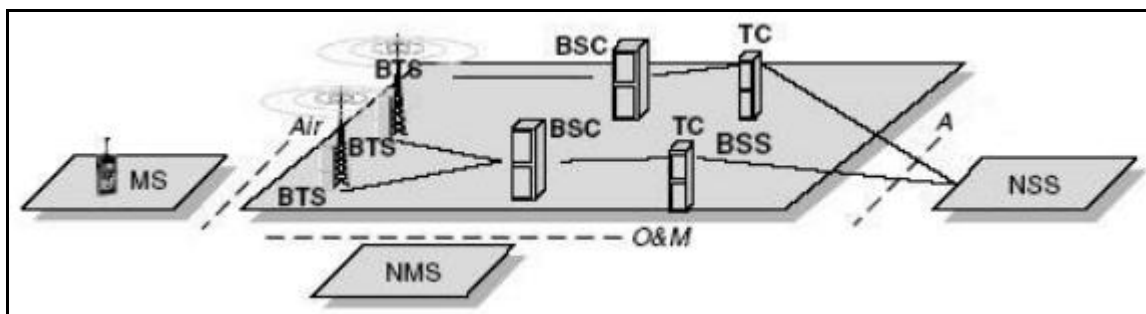


Ilustración 5 Arquitectura básica GSM

#### 2.2.1.1.1 Estación Móvil (MS)

Consta de dos elementos: el terminal móvil (MT) y el módulo de identificación del suscriptor (SIM). El MT es el equipo mediante el cual se realiza la comunicación, mientras que la SIM es la tarjeta inserta en el MT, la cual permite identificar las características del perfil del usuario móvil, pudiendo acceder a los servicios entregados por el operador de la red que estén habilitados para el perfil del suscriptor en cuestión. Como característica especial la SIM independiza al suscriptor del terminal móvil, permitiendo el uso de ésta en otro MT que sea GSM.

#### 2.2.1.1.2 Subsistema de estación base (BSS)

Este subsistema está constituido por los siguientes elementos:

- **Estación base trans-receptora (BTS):** es el elemento de red que mantiene la interfaz de radio y se hace cargo de la señalización, del cifrado de la interfaz de radio y del procesamiento de la voz. Estas son todas las funciones que debe realizar la BTS para garantizar una conexión libre de errores entre la MS y la BTS. La BTS define físicamente a una celda (o sector), la cual puede contener varios TRXs. Al conjunto de 3 celdas se le conoce como sitio.
- **Controlador de estación de base (BSC):** es elemento de red central del BSS y controla la red de radio. Entre otras características establece la conexión entre el MS y el NSS, gestiona la movilidad del usuario, recolecta las estadísticas de datos y soporta la señalización para las interfaces A y de aire.

### **2.2.1.1.3 Subsistema de conmutación de red (NSS)**

Este subsistema está constituido principalmente por los siguientes elementos:

- **Centro de conmutación de servicios móviles (MSC):** es el responsable de controlar las llamadas en la red móvil, identificando el origen y el destino de una llamada, así como el tipo de llamada. Un MSC actúa como puente entre una red móvil y una fija.
- **Registro de ubicación de usuario visitante (VLR):** es una base de datos que mantiene información relacionada a los suscriptores que están (en un determinado momento) en el área de servicio del MSC. El VLR procede con los registros de ubicación de los MSs y sus actualizaciones; su base de datos es siempre temporal, en el sentido que la información es mantenida mientras el suscriptor esté dentro del área de servicio.
- **Registro de ubicación de usuario doméstico (HLR):** mantiene en su base de datos un registro permanente de los suscriptores, además mantiene una base de datos temporal, la cual contiene la ubicación actualizada de los clientes. Esta información es necesaria para el encaminamiento de las llamadas.
- **Centro de autenticación (AuC):** protege contra la interceptación de la interfaz aérea. Mantiene las llaves de autenticación y algoritmos. Generalmente esta asociado al HLR.
- **Registro de identidad del equipo (EIR):** es una base de datos que es usada para monitorear que terminales existentes almacenando su IMEI (International Mobile Equipment Identity). Construye 3 sub-clases: La lista Blanca, La lista negra y la lista gris. Solo existe un EIR por red.

### **2.2.1.1.4 Subsistema de administración y/o gestión de red (NMS)**

Tiene como propósito monitorear varias funciones y elementos de la red móvil. Se preocupa de la administración y/o gestión de las fallas, de la configuración de la red y el desempeño de la misma, permitiendo además la captura de estadísticas. Con el NMS se cubren todos los elementos de la red. [18]

## **2.2.2 GPRS**

Este sistema agrega elementos nuevos a la red GSM, siendo los más importantes el Nodo de Soporte Servidor de GPRS (SGSN) y el Nodo de Soporte Pasarela de GPRS (GGSN). Las interfaces Gn y Gp, representan las redes vertebrales

(basadas en IP) Intra-PLMN e Inter-PLMN respectivamente, como se ve en la ilustración 6 que representa la arquitectura de red con sus componentes e interfaces.

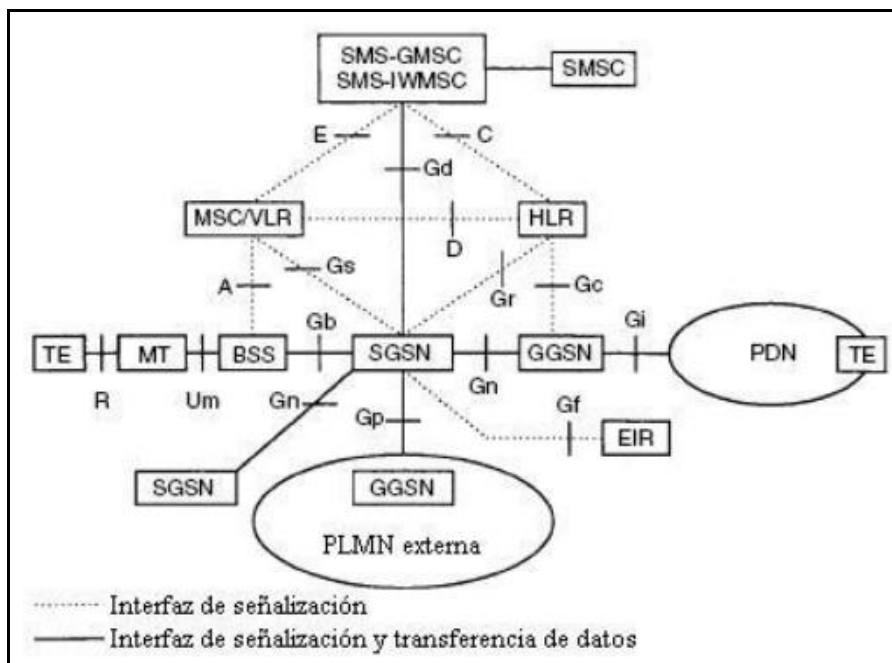


Ilustración 6 Arquitectura del sistema GPRS

El principal objetivo de esta tecnología es brindar acceso a redes de datos estandarizadas como las basadas en los protocolos TCP/IP y X.25. Estas redes consideran a la red GPRS como una sub-red normal, y el GGSN se comporta como un enrutador, ocultando a la red externa las características específicas de GPRS.

### 2.2.2.1 Terminales móviles GPRS

La característica principal que presentan a diferencia de GSM es que pueden operar en 1 de 3 modos, dependiendo del tipo de terminal (clase A, B o C) y si éstos están o no adjuntos simultáneamente a la red GPRS y GSM.

### 2.2.2.2 Unidad de control de paquetes (PCU)

Es el elemento de la red GPRS que se preocupa de separar el tráfico de voz o GSM (conmutado por circuitos) y el tráfico GPRS (conmutado por paquetes) generado por los usuarios, enviándolos a las redes GSM y GPRS según corresponda. Además la PCU desempeña la mayoría de las funciones de administración de los recursos de radio de la red (selección de esquema de codificación, asignación de recursos de radio, establecimiento de la conexión de radio, transferencia de datos, etc.), pudiendo encontrarse en la BTS, BSC o en algún punto entre el MT y el MSC.

### **2.2.2.3 Nodo de soporte servidor de GPRS (SGSN)**

El SGSN es el componente principal de la red GPRS, el cual se preocupa entre otras funciones de la gestión de movilidad y de la autenticación, teniendo además funciones de registro. El SGSN está conectado al BSC y representa para el MS GPRS, el punto de acceso a los servicios de la red GPRS. Cuando el SGSN, al autenticar los móviles GPRS, acepta el MS realiza un registro de éste a la red GPRS, preocupándose de la movilidad del mismo. Cuando un MS desea enviar (o recibir) información hacia (o desde) redes externas, el SGSN transfiere esta información al GGSN relevante (y viceversa).

### **2.2.2.4 Nodo de soporte pasarela de GPRS (GGSN)**

Está conectado a las redes externas basadas en protocolos IP y X.25. Desde el punto de vista de las redes externas, el GGSN es un enrutador a una sub-red, ya que éste esconde la infraestructura GPRS. Cuando el GGSN recibe información de datos dirigida a un usuario específico, revisa si la dirección IP está activa. Si lo está, el GGSN envía la información al SGSN que está sirviendo al MS, pero en cambio si la dirección no está activa, la información es descartada. Los paquetes de datos originados por el MS son encaminados hacia la red correcta por el GGSN. Éste rastrea al MS hasta el nivel de SGSN.

### **2.2.2.5 Gestión de sesión (SM)**

Se refiere al conjunto de procedimientos para la activación, modificación y desactivación de una sesión de transferencia de datos entre el MS y una red de datos externa. Para iniciar una sesión de dato, se asocia un MS con una dirección (típicamente IP), lo que se denomina PDP.

## **2.2.3 EDGE**

Esta tecnología aumenta la capacidad y las tasas de transmisión de datos, tanto para GSM (CS) como para GPRS (PS), requiriendo canales de transmisión de mayor capacidad. Mejora la eficiencia espectral a través del control de calidad del enlace y requiere una actualización de software en las redes GSM y GPRS desde el punto de vista técnico. No se requiere por ende hacer cambios en la topología de red GSM/GPRS ni invertir en nuevas licencias regulatorias. [19]

### **2.2.3.1 Modulación**

El uso de un esquema de modulación 8-PSK es una de las mejoras que EDGE introduce, dado que la tasa de transferencia de datos es tres veces mayor con respecto a la modulación de GSM (*Gaussian Minimum Shift Keying*, GMSK). En este nuevo esquema, los símbolos transmitidos son 1 de 8 sinusoides, las cuales tienen la misma amplitud y frecuencia pero difieren en fase. Los bits de datos digitales están

combinados en grupos de 3 bits, por lo que existen 8 combinaciones posibles. Cada uno de estos patrones de 3 bits es igualado a uno de los símbolos 8-PSK. En la ilustración 7 se puede ver la distribución de los símbolos del esquema de modulación 8-PSK.

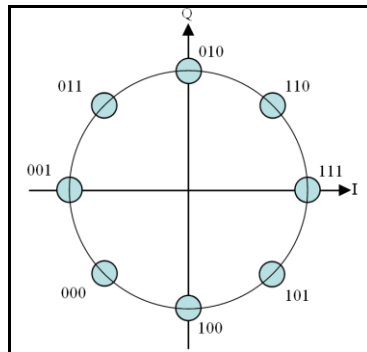


Ilustración 7 Diagrama de constelación de modulación 8-PSK

### 2.2.3.2 Codificación

Al igual que GPRS usa algoritmos de adaptación de tasas de transferencias que adaptan la modulación y los esquemas de modulación (MCS) de acuerdo a la calidad del canal de radio. EDGE puede ser hasta cuatro veces más eficiente que GSM, debido a que GSM usa cuatro esquemas de codificación (CS-1 a 4), mientras que EDGE entrega nueve modulaciones y esquemas de codificación (MCS-1 to 9). En la Tabla 1 se puede ver los distintos esquemas de codificación.

Codificación y Esquema de Modulación (MCS)	Velocidad [kbits/s/slots]	Modulación
MCS-1	8.80	GMSK
MCS-2	11.2	GMSK
MCS-3	14.8	GMSK
MCS-4	17.6	GMSK
MCS-5	22.4	8-PSK
MCS-6	29.6	8-PSK
MCS-7	44.8	8-PSK
MCS-8	54.4	8-PSK
MCS-9	59.2	8-PSK

Tabla 1 Esquemas de codificación de EDGE

## 2.3 UMTS

### 2.3.1 Arquitectura de UMTS (funcionalidad básica de los nodos)

Como se puede ver en la ilustración 8 la arquitectura básica de una red UMTS está compuesta por tres partes fundamentales:

- Terminales móviles ( *User Equipment*, UE)
- Red de acceso de Radio (*Radio Access Network*, RAN o UTRAN)
- Red central o núcleo de red (*Core Network*, CN). [1]

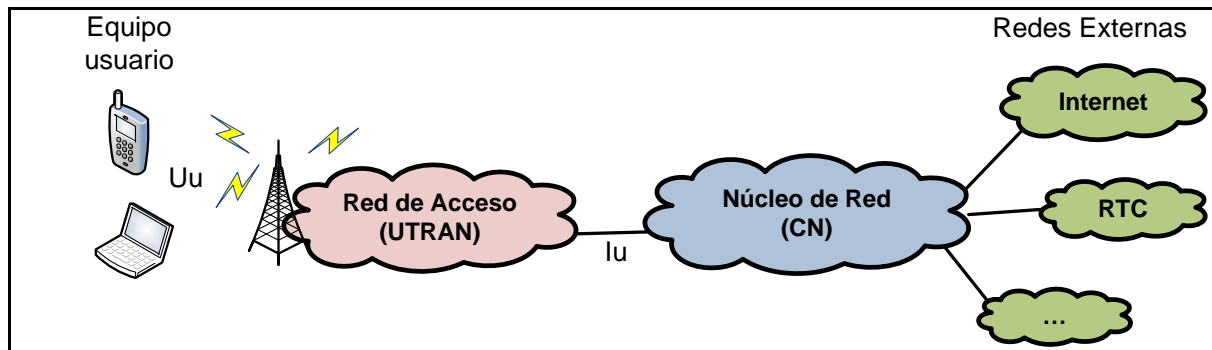


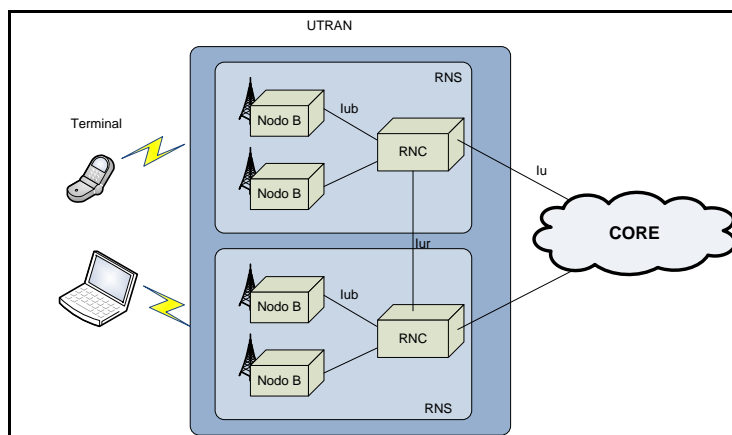
Ilustración 8 Arquitectura genérica de UMTS

El usuario accede a la red a través de la interfaz de radio Uu, que está basado en la tecnología de acceso WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*). La red de acceso UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*) se encarga de transportar todo el tráfico del usuario; ya sea voz, datos y señalización móvil-red; hasta el Núcleo de Red (*Core Network*, CN) a través de la interfaz Iu. Dentro del *Core Network* se encuentran los recursos necesarios de conmutación y transmisión para completar el trayecto de la comunicación hacia el abonado remoto, que puede pertenecer a la red UMTS o a una red externa.

#### 2.3.1.1 Red de acceso (UTRAN)

La red de acceso en UMTS establece el empleo de ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) como tecnología de transporte, debido principalmente para el despliegue de redes multiservicios con QoS. UTRAN consta de uno o más subsistemas RNS (*Radio Network Subsystem*), donde cada RNS cubre un conjunto de células UMTS, siendo responsable de la gestión de los recursos asociados a ellas. Un RNS está formado por un controlador RNC (*Radio Network Controller*) y un conjunto de estaciones base (Nodos B), como se puede ver en la ilustración 9.





**Ilustración 9 Arquitectura UTRAN**

Dentro de la red de radio se encuentran dos tipos de interfaces: la interfaz Iub entre cada Nodo B y el RNC que lo controla y la interfaz Iur entre los RNCs. La Iur principalmente permite la conmutación directa entre RNCs para el soporte de *Soft Handover* (explicado en la sección 2.3.2.3) entre estaciones bases perteneciente a distintos RNCs.

### 2.3.1.2 Core Network

Su principal función es la de conectar la red de acceso con las redes externas. Se encuentra formada por varios elementos:

En el dominio de **Conmutación de Circuitos** (CS) se encuentra el MSC (*Mobile Switching Center*), pieza central en una red basada en CS; el *Visitor Location Register* (VLR), mantiene una copia de perfil de los usuarios visitantes y la información precisa de la ubicación del UE (*User equipment*); y el *Gateway MSC* (GMSC) el cual es el switch que se conecta a las redes externas. En el dominio de **Conmutación de Paquetes** (PS) el SGSN (*Serving GPRS Support Node*) es pieza central en la red basada en PS y el GGSN (*Gateway GPRS Support Node*), pieza que conecta el la red Central con las redes externas. En el dominio de registro el elemento principal es el *Home Location Register* (HLR) que almacena copias de los perfiles de servicio de los usuarios y almacena la ubicación del UE en el nivel del MSC/VLR/SGSN.

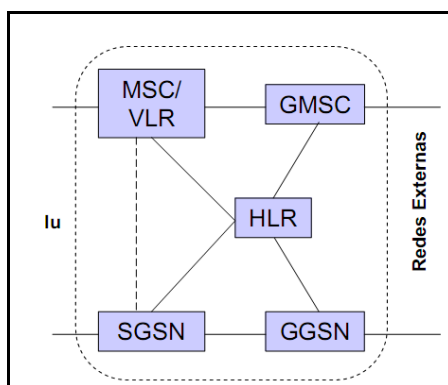


Ilustración 10 Arquitectura básica del Núcleo de Red

### 2.3.2 HSPA (HSDPA/HSUPA)

*High Speed Packet Access* es una tecnología complementaria a UMTS que consta de HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) y de HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*).

HSDPA mejora ampliamente el rendimiento de las transferencias de datos entregando tasas máximas teóricas de aproximadamente 14 Mbps. El despliegue inicial para tasas de *throughput* para el usuario está sobre los 1 Mbps, frecuentemente alcanzando los 1,5 Mbps (tres a cinco veces más rápido que UMTS *Release 99*) y aumenta con el tiempo debido al desarrollo de las capacidades de los terminales y de la red.

HSPA es completamente compatible con UMTS *Release 99* y todas las aplicaciones desarrolladas por *Release 99* sirven para HSPA. El mismo canal de radio de servicios para usuarios de voz y datos de UMTS puede ser usado simultáneamente para usuarios de datos de HSPA. HSDPA también posee significativamente menos latencia *end to end*, la cual es el tiempo promedio que demora un paquete IP en viajar desde un UE a través del sistema HSDPA a un servidor de Internet y volver. El promedio medido de latencia *end to end* en una red comercial con equipos de radio y core de Ericsson es bajo los 70 mili segundos.

Este sistema alcanza sus mayores velocidades a través de técnicas similares a las que impulsaron el rendimiento de EDGE sobre GPRS, incluyendo mayor orden de modulación, variabilidad de codificación, así como la adición de poderosas nuevas técnicas tales como el *fast scheduling*. Esta tecnología eleva el nivel de rendimiento de la tecnología WCDMA para entregar servicios de banda ancha y posee teóricamente el mayor *throughput* máximo que cualquier tecnología celular disponible actualmente que está desplegada. La mayor eficiencia espectral y la mayor capacidad de transferencia de datos no sólo permiten nuevas clases de aplicaciones, sino que también soporta a un mayor número de usuarios activos dentro de la red. [2]

HSPA logra las siguientes principales ganancias de rendimiento en las características de radio:

- Canales de alta velocidad compartidos en el dominio de código tiempo.

- Corto TTI (*Transmission Time Interval*)
- Rápida programación y diversidad de usuarios.
- Rápida adaptación del link.
- Mayor orden de modulación
- Rápida HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*)

### 2.3.2.1 HSDPA

A continuación se explicará brevemente las principales características que presenta esta tecnología [22]:

- **Canales compartidos de Alta Velocidad y Corto Intervalo de Tiempo de Transmisión**

HSDPA usa canales de datos de alta velocidad llamados *High Speed Physical Downlink Shared* (HS-PDSCH). Más de 15 de estos canales pueden operar en el canal de radio WCDMA de 5 MHz. Cada uno usa un factor de extendido (*spreading*) de 16. Las transmisiones de los usuarios son asignadas a uno o más de estos canales por un TTI corto de 2 ms, mucho menor a los intervalos de 10 a 20 ms usados en WCDMA *Release* 99. Entonces la red se puede dinamizar en cómo los usuarios se asignan a los diferentes HS-PDSCH cada 2 ms. El resultado es que los recursos son asignados en ambos dominios, tiempos (el intervalo TTI) y de códigos (los canales HS-PDSCH). La ilustración 11 muestra a los diferentes usuarios obteniendo los distintos recursos de radio.

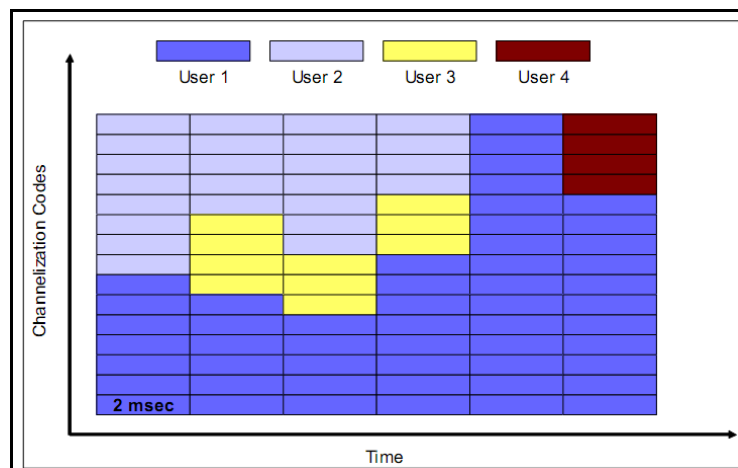


Ilustración 11 Ejemplo de canales de bajada de alta velocidad

- ***Fast scheduling* y diversidad de usuarios**

Esta técnica decide a cual terminal los canales compartidos de transmisión deben ser dirigidos en cierto instante.

Esta técnica aprovecha el corto TTI asignando canales de usuarios que tienen las mejores condiciones instantáneas del canal. La ilustración 12 muestra como un *scheduler* puede elegir entre dos usuarios basados en los cambios en sus condiciones de radio para priorizar el usuario con mejor calidad instantánea de la señal. El sistema también asegura que cada usuario reciba un nivel mínimo de *throughput*.

Existen distintos algoritmos de *scheduling* que toman en consideración el intercambio entre *throughput* e igualdad de condiciones, las características se pueden ver en la tabla 2.

- *Round Robin*: los recursos de radio son asignados a enlaces de comunicación en bases secuenciales, sin tomar en cuenta las condiciones instantáneas del canal de radio para cada uno de los enlaces.
- *Proportional Fair*: asigna el canal al usuario con mejor calidad de canal relativo a los otros usuarios. Es un tipo de *scheduling* que entrega un mayor *throughput* y que es bastante equitativo.
- Máxima relación *Carrier to Interference (C/I)*: para máximo *throughput* en la celda, los recursos de radio son asignados lo mayor posible a los enlaces de comunicación con mejores condiciones instantáneas de canal.

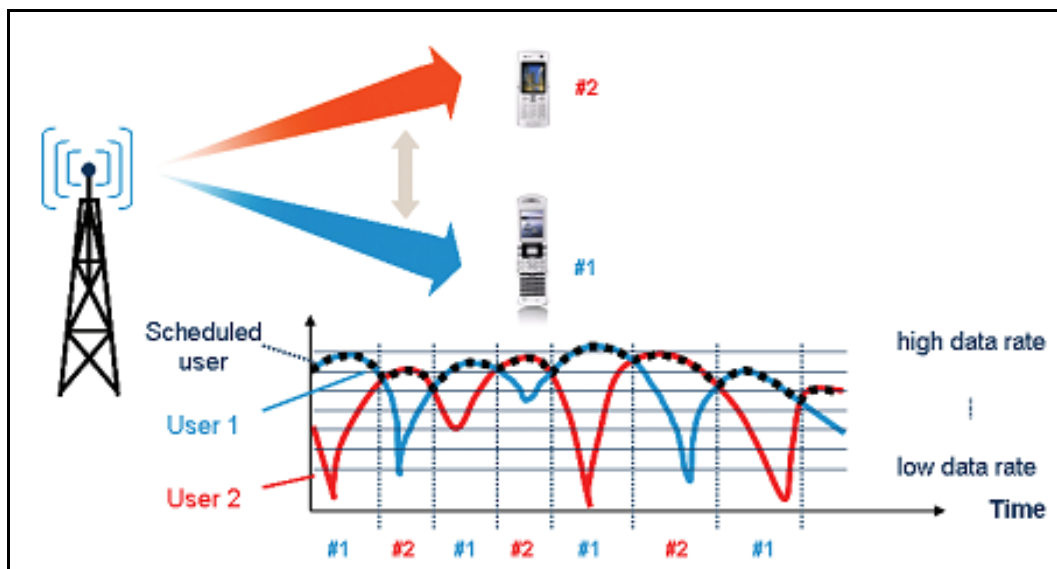


Ilustración 12 Ejemplo de *scheduling*

Scheduler de paquetes	Tipo de selección	Tasa de scheduling	Equidad / Desempeño
Fair Throughput (FT)	Es seleccionado el usuario con menor throughput	Rápido (2-20 ms básico); en la arquitectura de R99 es lento	Mismo promedio del throughput por usuario sobre el tiempo activo
Round Robin en el tiempo	Orden aleatorio de repartición de recursos	Rápido (2-20 ms básico); en la arquitectura de R99 es lento	Mismo promedio de recursos físicos pero distintas tasas de datos
C/I Máximo o Throughput Máximo	Maximizando el throughput o la calidad del canal	Rápido (2-20 ms básico)	Capacidad óptima de la celda pero una diferencia alta en las tasas de datos y limitado por la cobertura
Proportional Fair	Relación entre throughput instantáneo y promedio	Rápido (2-20 ms básico)	Aproximadamente el mismo promedio de los recursos físicos y distintas tasas de datos para los usuarios con una muy alta capacidad de transferencia

Tabla 2 Estrategias de *scheduling*

- **Modulación de alto orden**

HSDPA usa ambas modulaciones usadas en WCDMA (QPSK [*Quadrature Phase Shift Keying*] y en buenas condiciones de radio, un esquema de modulación avanzada, 16 QAM [*Quadrature Amplitude Modulation*]). El beneficio principal de 16 QAM es que 4 bits de data son transmitidos en cada símbolo de radio en contraste con los 2 de QPSK; con esta modulación el *throughput* de datos aumenta, mientras que QPSK está disponible bajo condiciones adversas. La evolución de HSPA sumará la modulación de 64 QAM para incrementos de tasas aún mayor.

- **Rápida adaptación del link (*Fast Link Adaptation*)**

Dependiendo de las condiciones del canal de radio, pueden ser empleados diferentes niveles de corrección de error (codificación de canal). Así como ejemplo, una tasa de codificación de tres cuartos significa que tres cuartos de los bits transmitidos son bits de usuario y un cuarto son bits de corrección de error. El proceso de elección y rápida actualización de la modulación óptima y de la tasa de codificación es llamada rápida adaptación del link. Esta adaptación es hecha en coordinación con la característica de *fast scheduling*.

- **Fast Hybrid Automatic Repeat Request (Fast Hybrid ARQ)**

El término fast se refiere al mecanismo de control del medio de acceso implementado en los Nodos B (con *scheduling* y adaptación de enlace), en oposición a las BSC en GPRS/EDGE, y hybrid se refiere al proceso de combinación de data repetida transmitida con anterioridad para aumentar la probabilidad de éxito en la codificación. Manejando y respondiendo a las variaciones de radio en tiempo real en las estaciones base, a diferencia de un nodo interno de la red, reduce *delays* y mejora aún más la totalidad del *throughput* de datos.

Usando todas estas características anteriormente descritas, HSDPA maximiza el *throughput* de datos, la capacidad y a su vez minimiza los retardos (*delays*). Para el usuario esto significa un mejor desempeño de la red bajo condiciones de carga, desempeño más rápido de las aplicaciones, un mayor número de éstas, y un aumento de la productividad.

La tabla 3 define las categorías de los dispositivos de HSDPA.

Categoría del HS-DSCH	Máximo número de códigos HS-DSCH	Tasa Máxima Capa 1 (Mbps)	QPSK/16QAM
Categoría 1	5	1,2	Ambos
Categoría 2	5	1,2	Ambos
Categoría 3	5	1,8	Ambos
Categoría 4	5	1,8	Ambos
Categoría 5	5	3,6	Ambos
Categoría 6	5	3,6	Ambos
Categoría 7	10	7,2	Ambos
Categoría 8	10	7,2	Ambos
Categoría 9	15	10,2	Ambos
Categoría 10	15	14,4	Ambos
Categoría 11	5	0,9	QPSK
Categoría 12	5	1,8	QPSK

Tabla 3 Categoría de terminales con HSDPA

### 2.3.2.2 HSUPA

Introducido en WCDMA 3GPP *Release 6*, HSUPA agrega un nuevo canal de transporte a WCDMA llamado *Enhanced Dedicated Channel (E-DCH)*. Se mejora el desempeño del *uplink* (enlace de subida) reduciendo la latencia, aumentando las tasas de datos y la capacidad, siendo con esto el complemento de HSDPA para un mejor desempeño de las aplicaciones de paquetes de datos [3]. Las transmisiones de HSUPA ofrece una gran cantidad de características nuevas, lo que al igual que en HSDPA la introducción de éstas tienen un impacto mínimo en los protocolos de

arquitecturas de las interfaces de radio. Se introducen nuevos medios de control de acceso en los ya existentes de los UE (*user equipment*), nodos B y RNC.

Para lograr las altas tasas de transferencia en el *uplink*, HSUPA posee principalmente las siguientes características:

- **Transmisión *Multi code*:** en contraste con HSDPA, el nuevo canal de *uplink* que es introducido con HSUPA no es compartido entre los usuarios, pero está dedicado a un único usuario. Hasta cuatro códigos pueden ser usados para aumentar las tasas de datos del *uplink*, como se puede ver en la tabla 2.

- **Reducción del *Transmission Time Interval (TTI)*:** WCDMA 3GPP Release 99 usa un TTI de 10 ms, 20 ms o 40 ms en el *uplink*. HSUPA opera con un TTI de 2 ms o 10 ms en el *uplink*. Esta reducción del TTI permite una disminución de la latencia total y entrega los medios para que las otras características se adapten rápidamente.

- ***Fast hybrid Automatic Repeat reQuest*:** el protocolo *fast hybrid ARQ* usado es similar al de HSDPA. El nodo B rápidamente puede requerir una retransmisión de la información recibida erróneamente, lo que hace al sistema más robusto y una menor latencia. Con HSUPA es posible lograr un mejor *Soft handover*, para lograrlo todas las estaciones bases y sectores involucrados intentan decodificar la información. Si un ACK (*acknowledge*) es recibido por al menos uno, el UE considera que la información fue recibida exitosamente.

- ***Fast scheduling*:** en el *uplink*, el recurso común entre los terminales es la cantidad de interferencia tolerable, la cual es la potencia total recibida por la estación base. La cantidad de recursos comunes de *uplink* que un terminal está usando depende de la tasa de datos usada. Generalmente, mientras mayor sea la tasa de datos, mayor es la potencia de transmisión requerida y mayor es el consumo de recursos. *Fast scheduling* permite una rápida reubicación de los recursos entre los UEs, también permite al sistema un mayor número de usuarios y adaptaciones rápidas a variaciones de interferencia, lo que lleva a un incremento en la capacidad y probabilidad de que el usuario pueda tener altas tasas de transferencias de datos.

El algoritmo de *scheduling* no está estandarizado y diferentes estrategias pueden ser implementadas. Esta flexibilidad es útil, ya que diferentes ambientes y distintos tipos de tráfico pueden requerir diferentes requerimientos en la estrategia de *scheduling*. Por ejemplo un UE puede ser provisto desde sólo una o desde varias estaciones bases al mismo tiempo. Así en el último caso, el *soft handover* debe ser provisto por el *uplink* mejorado. El UE no sólo es informado sobre el nivel de interferencia en la propia celda, sino también del nivel de las celdas vecinas. La potencia de salida del UE puede ser reducida si el nivel de interferencia es demasiado alta en las celdas vecinas. También la entrega de *soft handover* en el *uplink* provee de una ganancia de 1,5 dB.

Para poder acceder a HSUPA se requieren nuevos UEs, que debiesen tener el nivel de procesamiento para soportar las nuevas características descritas anteriormente. Seis diferentes categorías de terminales han sido definidas para dar cabida a las implementaciones como se ve en la Tabla 4. [10]

Categoría del UE	Códigos x spreading	TTI 10 o 2 ms	Tasa máxima para la capa 1 con 10 ms TTI (Mbps)	Tasa máxima para la capa 1 con 2 ms TTI (Mbps)
Categoría 1	1 x SF4	10 ms	0,73	-
Categoría 2	2 x SF4	Ambos	1,46	1,46
Categoría 3	2 x SF4	10 ms	1,46	-
Categoría 4	2 x SF2	Ambos	2	2,92
Categoría 5	2 x SF2	10 ms	2	-
Categoría 6	2 x SF2 + 2 x SF4	Ambos	2	5,76

Tabla 4 Categoría de terminales con HSUPA

### 2.3.2.3 Handover

La calidad de conexión debe ser mantenida en el movimiento del equipamiento de usuario (UE) entre celdas. Esa es la función del *handover*. En un sistema WCDMA, el *handover* es realizado a través de:

- **Soft/Softer Handover:** provee al UE la capacidad de sumar, remover y reemplazar links de radio con la misma frecuencia. En *Soft Handover* el UE es conectado a más de una Estación de Radio Base (RBS) simultáneamente. Al menos un link de radio está siempre activo y no hay interrupción en el flujo de datos durante el *handover* actual. Las señales son recibidas en el UE y combinadas en el receptor RAKE que entrega protección contra el desvanecimiento de la señal. En *Softer Handover* el UE está comunicado con una RBS a través de distintos links de radio. El *Softer Handover* es un *handover* entre 2 o más celdas de la misma RBS.
- **Hard Handover (Inter Frequency Handover):** este tipo de *handover* ocurre cuando el UE hace un *handover* (HO) a otra frecuencia WCDMA. En este caso el canal de tráfico y control son desconectados y deben reconectarse.
- **Inter-System Handover:** *handover* entre sistema con tecnología WCDMA a un sistema análogo (1G) o un sistema con tecnología TDMA (2G, por ejemplo GSM). En este caso los canales de tráfico y control son desconectados y deben reconectarse. Esto también corresponde a un tipo de *Hard Handover*.

Durante un *Hard handover* o un *Inter-System Handover*, el UE tiene sólo un link de radio activo. Durante estos tipos de *handover* la conexión se quiebra por un corto periodo de tiempo.



## 2.4 Clases de tráfico y Calidad de Servicio en Aplicaciones

Una de las ventajas que entrega HSPA es el soporte a una gran variedad de servicios, debido a la capacidad de transmisión que posee esta tecnología. El desarrollo de servicios se encuentra bastante avanzado, debido a la existencia de contratos entre proveedores de infraestructura, terminales y proveedores de servicios; así como entre proveedores de servicios y proveedores de contenidos, que están creando plataformas de mensajería multimedia, juegos Java, *streaming* de medios, *roaming* internacional, mapas para servicios de ubicación ,etc.

Desde el punto de vista de los requisitos de QoS (*Quality of Service*), y atendiendo fundamentalmente al criterio de su tolerancia al retardo, en UMTS se han definido cuatro clases de tráfico:

- **Conversacional.** Dentro de esta clase se encuentran las comunicaciones de audio y vídeo en tiempo real entre personas. Este tipo de comunicaciones se caracteriza por exigir un retardo extremo a extremo muy reducido, con objeto de que los usuarios no pierdan la sensación de interactividad. Ejemplos de aplicaciones conversacionales son la telefonía, la videotelefonía o la videoconferencia.
- **Streaming** (afluente). En esta categoría se incluyen las aplicaciones que permiten a los usuarios la descarga de contenidos multimedia (audio y video clips) para su reproducción on-line, con una sensación que, sin serlo, se aproxima a la de tiempo real. El hecho de que la transferencia de información sea unidireccional permite retrasar el instante de inicio de la reproducción posibilitando el empleo de “buffers” relativamente grandes en el extremo receptor para absorber las fluctuaciones de retardo. Ello permite relajar significativamente los requisitos de retardo con respecto a los servicios conversacionales.
- **Interactivo.** Esta clase de tráfico engloba las aplicaciones de acceso remoto a información en la modalidad online, donde el usuario (o una máquina) envía peticiones hacia el equipo remoto esperando que éste le devuelva las respuestas en un tiempo razonablemente reducido. Ejemplos de aplicaciones bajo esta categoría son la navegación web, las consultas a bases de datos o el acceso remoto a ordenadores (telnet).
- **Background.** Esta última clase da cabida a un número considerable de aplicaciones de datos en las que el usuario no exige una respuesta inmediata por parte de la red, admitiendo retardos que oscilan desde unos pocos segundos hasta incluso varios minutos. Ejemplo de tales aplicaciones son el correo electrónico o la descarga de archivos, por citar algunas.

Clases de Servicio	Naturaleza	Características Básicas	Ejemplos
Conversacional	Servicios de Tiempo Real	Preserva el límite del retardo y la variación de tiempo entre paquetes. Este retardo es pequeño y constante.	Voz, videoteléfono, voz sobre IP
<i>Streaming</i>	Servicios de Tiempo Real	Preserva la variación de tiempo entre paquetes. Retardo constante pero necesariamente reducido.	Flujo de tráfico continuo de video o audio
Interactiva	Servicios de Tiempo <b>no</b> Real	Modelo de petición y respuesta. Preserva el contenido de los datos. Posee retardos moderados y bajas tasas de errores	Navegación en internet
<i>Background</i> (aplicaciones de fondo)	Servicios de Tiempo <b>no</b> Real	No es necesaria la interacción. Preserva el contenido de los datos	Correo electrónico, descarga de datos, MMS, SMS.

Tabla 5 Clases de servicios

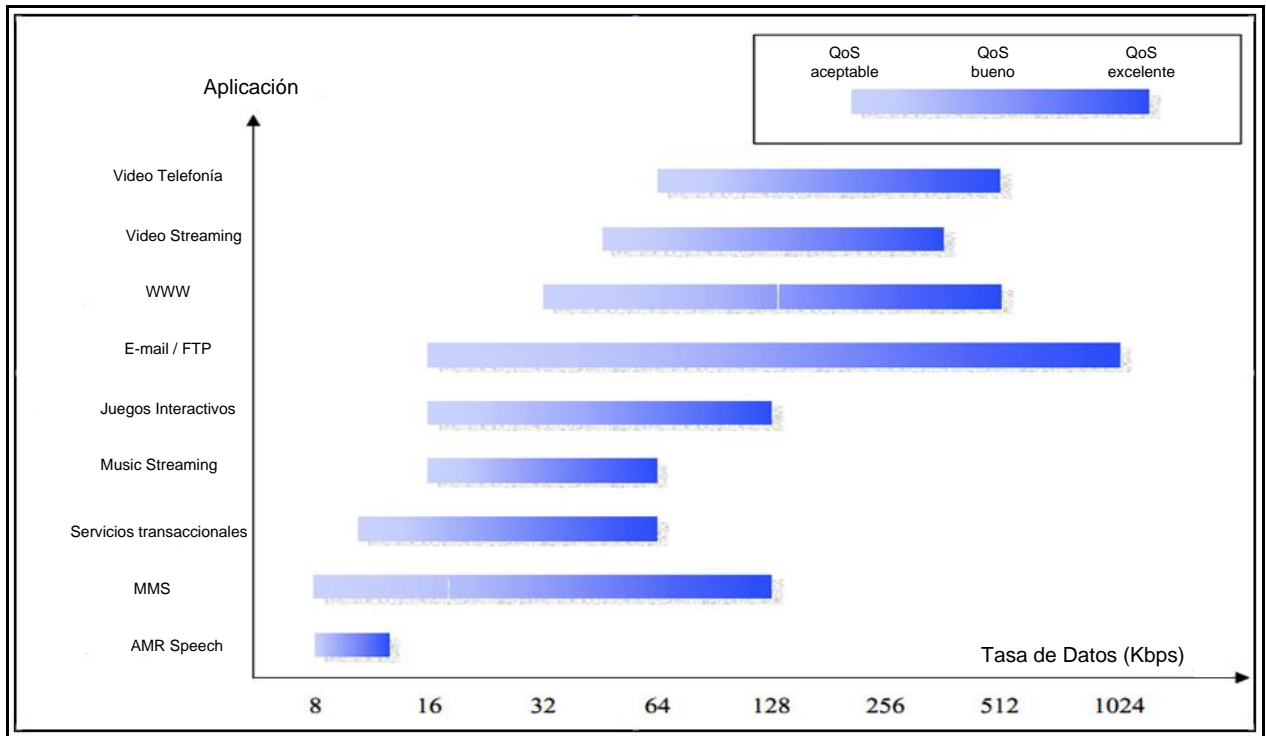
La formalización del concepto de calidad de servicio en UMTS recurre a la clásica solución consistente en la definición del correspondiente conjunto de parámetros o atributos.

Así, en la especificación TS 23.207 [4] se define una docena de atributos de calidad de servicio, así como el rango de valores que éstos pueden tomar.

Para realizar un tratamiento detallado del problema de realizar un modelo de calidad de servicio para la red de datos HSPA se debiera tener en consideración múltiples factores con especial cuidado los siguientes:

- La carga de tráfico a soportar en cada interfaz, teniendo en cuenta las distintas contribuciones (tráfico de usuario, señalización, gestión, sobrecarga de cabeceras etc.)
- Los parámetros de tráfico de fuentes (tasa de punta, tasa media, factor de actividad, etc.)
- Los requisitos de QoS (tolerancia a pérdidas y retardos) asociados a cada tipo de tráfico.
- Las diferentes estrategias de multiplexión de tráfico sobre ATM y el ahorro de ancho de banda que éstas pueden proporcionar (ganancia por multiplexión estadística).
- Las políticas de gestión de tráfico (control de admisión, priorización de tráfico, control de congestión, etc.

La consideración detallada de todos estos factores puede conducir a modelos analíticos muy complejos. Es por ello que en la práctica suele recurrirse a modelos simplificados (modelos con varios estados de actividad, modelos de fluidos, etc.) o al empleo de técnicas de simulación [1]. Con todas estas consideraciones es necesario crear un modelo que más se ajuste a los requerimientos de cada servicio entregando un QoS como se ve en la ilustración 13 y con valores que se ajusten a la tabla 6.



**Ilustración 13** Requerimientos de velocidades para distintos tipos de servicios

Clase de Servicio	Aplicación	Tasa de datos (Kbps)	Retraso	Pérdidas (%)
Conversacional	Voz	4 – 25	< 150 ms (preferido) < 400 ms (límite)	< 3 FER
	Videoconferencia	32 – 384	< 150 ms (preferido) < 400 ms (límite)	< 1 FER
	Telemetría (dos sentidos)	< 28.8	< 250 ms	0
	Juegos interactivos	< 1	< 250 ms	0
	Telnet	< 1	< 250 ms	0
Afluente	Audio	32 – 128	< 10 s	< 1 FER
	Video	32 – 384	< 10 s	< 1 FER
	Transferencia de datos		< 10 s	0
	Imágenes		< 10 s	0
	Telemetría (monitoreo)	< 28.8	< 10 s	0
Interactiva	Mensajes de voz	4 – 13	< 1 s	< 3 FER
	Navegación Web	29	< 4 s	0
	Servicios de transacción	20	< 4 s	0
	Correo electrónico	16	< 4 s	0
Diferida	Servicio de mensajes cortos	< 1.5	< 30 s	0
	Fax	9 – 33	< 30 s	0

**Tabla 6 Valores principales para el soporte de distintos tipos de servicios**

En la tabla 5 se pueden ver los requerimientos en cuanto a retrasos, tasas de datos y porcentaje de tolerancia en la tasa de error de tramas (FER, *Frame Error Rate*). En UMTS los parámetros de calidad de servicio que definen un servicio de portadora son los siguientes [5]:

- Clase de tráfico (Conversacional, *streaming*, interactivo o diferido).
- Máxima tasa de bit (Kbps). Máximo número de bits que puede enviar una portadora en un intervalo específico. Sólo se proporciona cuando existen recursos disponibles.
- Tasa de bit garantizada (Kbps). Máximo número de bits que se garantiza enviar en un tiempo específico. Esta tasa siempre está disponible y solamente se entrega para servicios conversacionales y de *streaming*.
- Orden de envío (s/n). Determina si la portadora ordena los SDU (*Service Data Unit*) en el orden correcto o no. Un SDU es un conjunto de datos que una determinada capa envía a la capa inferior. Para enviar un SDU se le agrega cierta información de control conocida como encabezado, un SDU y su respectivo encabezado constituyen un PDU (*Packet Data Unit*).
- Tamaño máximo de SDU (octetos). En múltiplos de 10 octetos hasta 1500.
- Información del formato SDU (bits). Es una lista de posibles tamaños exactos de SDU para una aplicación.

- Tasa de error de bit residual. Indica la tasa de error de bit no detectada en el envío de los SDU cuando se usa detección de errores, o la tasa total de error de bit cuando no se usa. De  $5 \times 10^{-2}$  hasta  $6 \times 10^{-8}$ .
- Envío de los SDU erróneos (s/n). Indica si se deben enviar o eliminar los SDU detectados con errores, o enviarse sin considerar la detección de errores.
- Retraso de transferencia (ms). Indica el retraso máximo del 95% de la distribución del retraso para todos los SDU enviados durante un servicio de portadora.
- Prioridad de manejo de tráfico. Determina la importancia relativa de manejo de los SDU en una portadora comparada con otra, esta prioridad sólo se usa en la clase interactiva para ofrecer múltiples subniveles de calidad de servicio.

### 2.4.1 Calidad de servicio en UMTS (arquitectura de QoS en UMTS)

El QoS de UMTS sigue una estructura de niveles en función de los diferentes servicios portadores entre distintos puntos de acceso del sistema, definida en la especificación TS 23.107 [6] donde cada servicio portador incluye todos los aspectos para garantizar el QoS por el usuario: señalización de control, transporte de información desde el usuario y la gestión del QoS. Esta arquitectura y manejo de ella tiene como objetivo el no limitar a los equipos terminales ni a las posibles redes de destino.

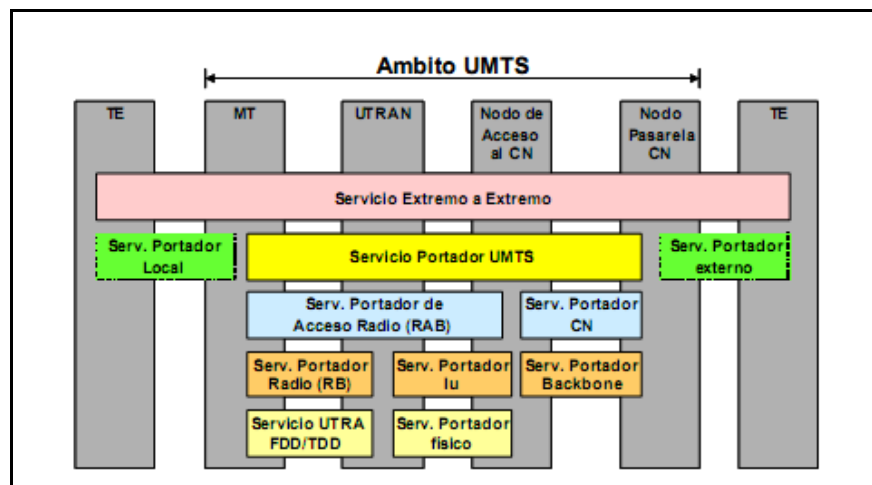


Ilustración 14 Arquitectura de QoS en UMTS

El dimensionamiento de UTRAN está hecho para los modelos desarrollados dentro del ámbito de las redes multiservicios que ofrecen QoS. Pero el problema es que aún no existen estudios y experiencia suficientemente establecida en este terreno.

Principalmente la capacidad que va a tener una celda va a depender de los tipos de servicios activos y de las condiciones de la interfaz de radio, especialmente en el nivel de interferencias existentes. Las medidas de interferencias están correlacionadas con el número de llamadas activas mostradas por servicio, de ahí la importancia de poder reconocer el tipo de servicio requerido.

### **2.4.2 Estado del Arte de la calidad de servicio**

No existe una medida universal de rendimiento para los sistemas de telecomunicaciones. De hecho, los usuarios (subscriptores) y los operadores de red definen el rendimiento de una forma distinta. Los usuarios desean obtener el mejor nivel posible de calidad, mientras que los operadores quieren tener la mayor cantidad de ingresos posibles, por ejemplo teniendo la mayor cantidad posible de usuarios posibles en el sistema.

Con la introducción de las redes 3 y 3.5G surgieron importantes mejoras en el desempeño de la red en comparación a redes 2G y además como las especificaciones de WCDMA siguen evolucionando el apoyo en redes de paquetes sigue mejorando. Así las dos primeras fases de esta evolución denominado WCDMA *Evolved* requiere la introducción (en Rel-5) de HSDPA y la introducción (en Rel-6) de HSUPA. En comparación con versiones anteriores de WCDMA estos cambios soportan mejor tasa de transmisión de datos y menos retardo, es decir mejoran en gran medida la experiencia adquirida durante el servicio y la capacidad del sistema.

### **2.4.3 Perspectiva usuario final**

El servicio de mejor esfuerzo no garantiza una tasa fija de bits. En cambio a los usuarios son asignados cualquier tasa de bits que está disponible bajo las condiciones del momento. Ésta es una propiedad general de las redes de conmutación de paquetes, lo que significa que los recursos de red no están reservados para cada usuario. Así el usuario en una red de radio con buenas condiciones puede disfrutar de una tasa máxima de bits en la interfaz de aire. Pero si las condiciones de radio son inferiores a las óptimas o existe interferencia de parte de otros usuarios, la tasa de bit de la interfaz de radio será menor que la tasa máxima. Además algunos paquetes de información pueden perderse, donde cada paquete perdido tiene que ser retransmitido por lo que se reduce la tasa efectiva de bits vista desde los protocolos de las capas superiores (como IP). Igualmente la tasa efectiva de bits disminuye aún más mientras la distancia de las celdas aumenta (debido a las pobres condiciones de radio en los extremos de la celda).

La máxima tasa de la interfaz de aire y las condiciones de radio no son los únicos factores que limitan el rendimiento. Tomando la red de acceso y el núcleo de red como un todo, en todo el camino al servidor de la aplicación también es posible encontrar retardos (*delays*) en varios nodos de red y de protocolos. Este resultado es una tasa de bit (*object bit rate*), la cual está medida a nivel de capa de aplicación, que tiene en cuenta todos los *delays* y está promediada sobre los objetos transmitidos hacia o desde el usuario final. [7]

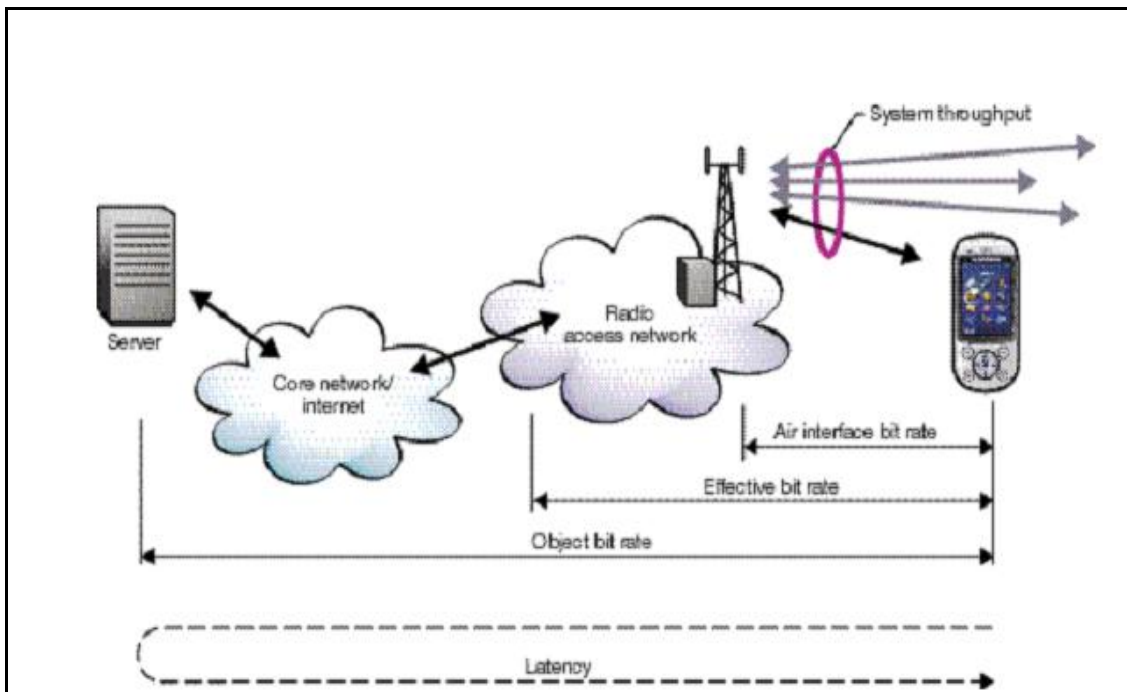


Ilustración 15 Definiciones de tasa de bit end to end

#### 2.4.4 Perspectiva del operador de red

Los recursos de red tienen necesariamente que ser compartidos cuando múltiples usuarios están en la red. Como resultado, toda la información tiene que ser encolada antes de ser transmitida, lo que restringe la tasa efectiva de bit para cada usuario. Así es necesario saber en que celda existen llamadas activas e identificar el tipo de servicio relativo a cada llamada en particular. No obstante programando los recursos de radio los operadores pueden mejorar el *throughput* del sistema o el número total de bits por segundo transmitido sobre la interfaz aérea. HSPA emplea métodos de programación inteligente para optimizar el desempeño. Una medida importante para los operadores es el número de usuarios activos que pueden conectarse simultáneamente. Así dado que los recursos del sistema son limitados existe un *trade-off*, en términos de la tasa de bits, entre los usuarios activos y la calidad de servicio.

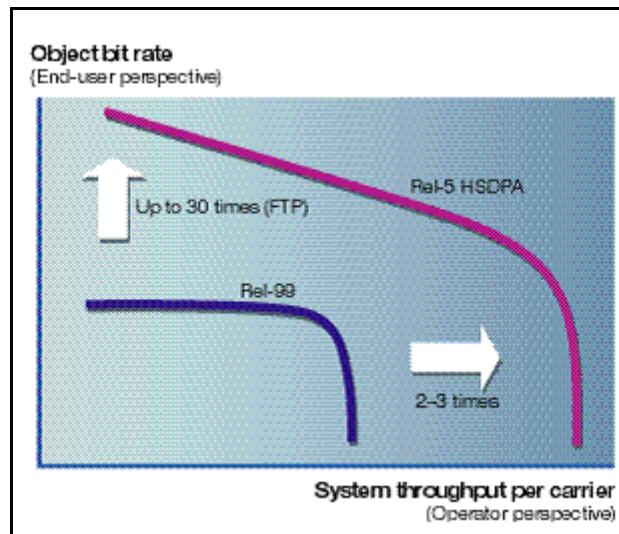


Ilustración 16 Potencial de HSPA

Como resumen el parámetro más crítico que afecta al desempeño de HSDPA es la transmisión de potencia, así el rendimiento total de una red HSPA dependerá de los siguientes factores:

- El número de spreading codes (5, 10 o 15 multicodes).
- El tipo de modulación (QSPK, 16-QAM; donde la modulación 16-QAM es opcional para la red y también para el usuario (UE)).
- El nivel de corrección de error.
- Capacidad de los dispositivos de los usuarios.

## 2.5 Evolución

La evolución en las telecomunicaciones móviles se desarrolla de una forma veloz, desarrollando distintas ramas y características particulares. En esta parte se comentarán dos tecnologías que van a jugar un rol importante en el mundo de las telecomunicaciones, el desarrollo de IPv6 y de la tecnología móvil LTE.

### 2.5.1 IP Release 6

La *Internet Engineering Task Force* (IETF) creó el proyecto IPng: **Internet Protocol the next Generation**, también llamado **IPv6**, la cual es la actualización a la versión 4 (IPv4). Perteneciente al “*Stack*” o pila de protocolos TCP/IP (Protocolo de Control de Transmisión/Protocolo de Internet), utilizado para identificar por medio de una dirección lógica, a la interfaz o interfaces (punto de conexión) de cada computadora o dispositivo que se conecta a Internet o a una red local. [8]



## Características principales

- Mayor espacio de direcciones. El tamaño de las direcciones IP cambia de 32 bits a 128 bits. Así se soportan más niveles de jerarquías de direccionamiento y más nodos direccionables.
- Simplificación del formato del *Header*. Algunos campos del *header* IPv4 se quitan o se hacen opcionales.
- Paquetes IP eficientes y extensibles, sin que haya fragmentación en los *routers*, alineados a 64 bits y con una cabecera de longitud fija, más simple, que agiliza su procesamiento por parte del *router*.
- Posibilidad de paquetes con carga útil (datos) de más de 65.355 bytes.
- Seguridad en el núcleo del protocolo (IPsec). El soporte de IPsec es un requerimiento del protocolo IPv6.
- Capacidad de etiquetas de flujo. Puede ser usada por un nodo origen para etiquetar paquetes pertenecientes a un flujo (*flow*) de tráfico particular, que requieren manejo especial por los *routers* IPv6, tal como calidad de servicio no por defecto o servicios de tiempo real. Por ejemplo video conferencia.
- Autoconfiguración: la autoconfiguración de direcciones es más simple. Especialmente en direcciones *Aggregatable Global Unicast*, los 64 bits superiores son configurados por un mensaje desde el *router* (*Router Advertisement*) y los 64 bits más bajos son configurados con la dirección MAC (en formato EUI-64). En este caso, el largo del prefijo de la subred es 64, por lo que no hay que preocuparse más por la máscara de red. Además el largo del prefijo no depende en el número de los *hosts* por lo tanto la asignación es más simple.
- Renumeración y "*multihoming*": facilitando el cambio de proveedor de servicios.
- Características de movilidad, la posibilidad de que un nodo mantenga la misma dirección IP, a pesar de su movilidad.
- Ruteo más eficiente en el *backbone* de la red, debido a la jerarquía de direccionamiento basada en *aggregation*.
- Calidad de servicio (QoS) y clase de servicio (CoS).
- Capacidades de autenticación y privacidad.[9]

Debido a la gran cantidad de nuevas aplicaciones en las que IPv4 es utilizado, ha sido necesario agregar nuevas funcionalidades al protocolo básico, aspectos que no fueron contemplados en el análisis inicial de IPv4, lo que genera complicaciones en su escalabilidad para nuevos requerimientos y en el uso simultáneo de dos o más de dichas funcionalidades. Entre las más conocidas se pueden mencionar medidas para permitir la Calidad de Servicio (QoS), Seguridad (IPsec) y movilidad lo que influye en el diseño posterior de las redes móviles ampliando sus capacidades.

### 2.5.2 LTE

A través de HSPA y HSPA+ (Release 7) se ofrece una gran eficiencia de servicio de banda ancha inalámbrica que tendrá un gran éxito por lo menos una década. En la fecha de impresión de esta memoria 3GPP está trabajando en un proyecto llamado *Long Term Evolution* LTE como parte de Release 8. LTE permitirá a los operadores

lograr alcanzar aún mayores *peak de throughput* en un mayor espectro de ancho de banda. El trabajo en LTE empezó en el 2004, con el inicio de un elemento oficial de trabajo en 2006 y con una completa especificación en el 2008. Siendo el 2009 el posible despliegue de esta tecnología. LTE usa OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) en el *downlink* que está adaptado para alcanzar altos *peak* de transferencia en un amplio espectro de ancho de banda. La radio tecnología WCDMA es igualmente de eficiente entregando máximos de transferencia de datos de aproximadamente 10 Mbps en un ancho de banda de 5 MHz. Sin embargo alcanzando máximos en el intervalo de los 100 Mbps con amplios canales de radio resultaría en terminales muy complejos y no es práctico con la tecnología existente. OFDMA ofrece en este caso una ventaja en la implementación. La programación de los enfoques en el dominio de la frecuencia minimiza la interferencia impulsando con esto la eficiencia espectral, este enfoque también es ampliamente flexible en la canalización y LTE operará en varios canales de radio de tamaños desde los 1,25 a 20 MHz.

Las principales características que posee LTE son:

- Transferencias máximas de bajada de hasta 326 Mbps con un ancho de banda de 20 MHz.
- Transferencias máximas de subida de hasta 86,4 Mbps con un ancho de banda de 20 MHz.
- Operación en ambos modos FDD (*Frequency Division Duplex*) y TDD (*Time Division Duplex*).
- Ancho de banda escalable a 20 MHz, cubriendo 1,25; 2,5; 5; 10; 15; y 20 MHz en la fase de estudio.
- Aumento de la eficiencia espectral sobre HSPA Release 6 por un factor de dos a cuatro.
- Reducción de la latencia hasta 10 ms RTT entre los equipos de los usuarios y las estaciones bases y transacciones no menores a 100 ms desde inactivo a activo.[2]

La Tabla 6 muestra las tasas máximas de datos basadas en los distintos diseños de subida y de bajada para un ancho de banda de 20 MHz.

<b>LTE Configuration</b>	<b>Downlink (Mbps) Peak Data Rate</b>	<b>Uplink (Mbps) Peak Data Rate</b>
Using 2X2 MIMO in the Downlink and 16 QAM in the Uplink	172.8	57.6
Using 4X4 MIMO in the Downlink and 64 QAM in the Uplink	326.4	86.4

Tabla 7 Tasas de transferencias en LTE

# Capítulo 3

## Modelo de Calidad de Servicio para una red de datos HSDPA

### 3.1 Introducción

Debido a que inicialmente las redes de celulares fueron diseñadas sólo para servicios de voz se utilizaban recursos dedicados entregando una tasa constante de bits con un retardo fijo e insignificante, lo que facilitaba el dimensionamiento usando la fórmula de *Erlang-B*. Con *Erlang-B*, conocida la carga de tráfico se obtiene la cantidad de recursos (canales) con la probabilidad de bloqueo deseada, en cambio con la incorporación de servicios de datos, hace imposible el dimensionamiento de los recursos inalámbricos usando una simple fórmula.

Para garantizar que la promesa de QoS para el usuario final sea cumplida, debe existir un correcto dimensionamiento y configuración de los elementos de red así como sus interfaces. Por ejemplo, los servicios en tiempo real requieren que todas las interfaces de red garanticen un determinado *throughput* para el usuario, si cualquiera de ella no cumple con los requerimientos, el *throughput end-to-end* no podrá ser cumplido. De la misma forma los retardos que se generan en cada elemento de red e interfaces son acumulables lo que afecta al usuario final con un *delay* que es la suma de ellos. De ahí la importancia de que cada elemento e interfaz deba ajustarse a un umbral límite para poder cumplir con el requerimiento específico de cada servicio.

El modelo presentado en esta memoria se enfoca en el *throughput* que recibe el usuario final, para que pueda cumplir con la Calidad de Servicio que se desea entregar. Por eso si se analiza cada elemento de la red y las interfaces involucradas, se encuentran diferencias en el comportamiento así como en los recursos. Mientras que los recursos de radio son compartidos entre varios usuarios, siendo el tipo de *scheduler* el que determina como soportar los requerimientos de QoS para cada servicio, el CN se caracteriza por altas tasas de bits y bajos retardos, siendo la interacción con las partes del RAN y los mecanismos de control de congestión las principales causas de mayores retardos en la red y menor *throughput* para el usuario.

## 3.2 Marco Metodológico e Hipótesis de Trabajo

Para realizar el modelo se sigue un procedimiento que está basado en las pautas de metodologías de investigación [20], principalmente para eliminar los errores en la elaboración y validación del modelo.

### 3.2.1 Diseño

Como métodos de investigación en esta memoria se usan principalmente:

- **Método descriptivo:** se describen las estructuras de los fenómenos y su dinámica, identificando los aspectos relevantes de la realidad.
- **Método explicativo:** además de haber descrito el fenómeno se trata de buscar la explicación del comportamiento de las variables. Esta metodología es básicamente cuantitativa para el descubrimiento de las causas.
- **Método predictivo:** se trata de predecir los fenómenos, después de haberlos explicado.
- **Método experimental:** se realizan experimentos para lograr explicar causalmente los fenómenos más importantes que van a influir en el modelo propuesto.

Para realizar el modelo principalmente se toman las siguientes consideraciones previas:

Generales:

- Este modelo está basado en la red de Entel PCS, principalmente en su red 3G *Release 5*.
- Se realiza el modelo sólo incluyendo las variables y parámetros explicados la sección 3.4, el resumen se puede ver en la ilustración 33.
- Se realiza el modelo basado en un modelo probabilístico.

Específicas:

- Todos los terminales con los que se realizaron las pruebas son equipos de categoría 9 (ver tabla 3 para las capacidades), y poseen HSDPA incorporado.
- No se estudió, ni se considera la tecnología HSUPA en la implementación.
- No se toma en cuenta el HO, ni sus efectos en el resultado final.
- Los tipos de *scheduling* (asignación de los recursos de radio) que se estudian es el *scheduling* de *Round Robin* y el de *Proportional Fair*.
- El resultado del *scheduling* de *Round Robin* es una aproximación debido a que sólo se realizaron pruebas en el laboratorio, siendo un ambiente ideal.
- Las probabilidades iniciales del modelo (*background*) representan las características de la red en un estado normal (tomando en cuenta los métodos de toma de

- mediciones), mientras que el comportamiento de las variables aleatorias se obtuvieron mediante las pruebas en el laboratorio y/o mediante la literatura.
- Se estudia sólo el comportamiento de la red interna de Entel, por lo que se crearon sesiones FTP con servidores conectados directo al *core*. Se estudia el caso en que el servidor se encuentra antes y después de un *firewall*. La arquitectura de las pruebas se puede ver en el apéndice B.
  - No se estudian los comportamientos de la red frente a distintos tipos de servicios. Sólo se analiza el comportamiento frente a servicios FTP, debido a que sólo se quiere estudiar el comportamiento del *throughput* del usuario final.

### 3.3 Modelo Probabilístico

#### 3.3.1 Introducción

Un modelo generalmente es útil si ayuda a entender el mundo que se está analizando y si permite realizar predicciones útiles acerca de cómo éste se comporta. A menudo es más fácil de experimentar con el modelo en comparación con la realidad.

En este trabajo se decide realizar un modelo probabilístico debido a que existe incertidumbre en los elementos que conforman la red de datos móviles bajo estudio. Esto ocurre debido a que los hechos y el comportamiento de las variables que la afectan no son conocidos con exactitud (podría existir subjetividad, imprecisión, errores, datos ausentes, etc.) y además porque el conocimiento del comportamiento no es determinístico (por ejemplo las relaciones entre el desempeño de la red con sus componentes). El modelo probabilístico utilizado para representar a la red HSDPA y poder predecir un parámetro de calidad de servicio está basado en Redes Bayesianas (RB).

Las RB representan un modelo probabilístico completo del sistema, ya que la distribución de probabilidad conjunta de cualquier estado elemental del sistema puede ser derivado usando las distribuciones de probabilidad condicional y la topología de la red. Por medio de las RB es posible hacer representaciones probabilísticas sobre la relación de variables de una red de datos y de esta manera obtener indicadores de su comportamiento. Al establecer las relaciones causa-efecto, es necesario considerar los aspectos que realmente tengan incidencia en la arquitectura de red.

#### 3.3.2 Redes Bayesianas

La Red Bayesiana (RB) es un grafo acíclico directo  $G = ((V, E), P)$ , en el cual  $V$  representa el conjunto de nodos que pueden ser variables aleatorias,  $E$  los lazos o arcos representando influencias probabilísticas entre estas variables y  $P$  las relaciones condicionales entre variables o tablas de probabilidad condicional (TPC), las cuales muestran la fuerza de las dependencias entre las variables. Un grafo acíclico directo es un grafo dirigido que no tiene ciclos, lo que significa que para cada vértice  $v$ , no hay un camino que empiece y termine en  $v$ . [11]

La consecuencia del estado de los procesos de datos, telecomunicaciones y de producción tienen un comportamiento probabilístico. Por lo tanto es necesario determinar un diagrama causa efecto que representa los efectos de las perturbaciones externas e internos sobre los procesos productivos de la industria, en los cuales se tiene en cuenta la presencia de perturbaciones o cambios de topología de la red debido a daño de equipos y la repercusión en las funciones del proceso productivo asociado.

Una red Bayesiana consta de dos partes:

- **Parte cualitativa:** conjunto de nodos, en el que cada uno representa una variable aleatoria discreta con un número finito de estados excluyentes; y como se dijo las conexiones de los nodos que representan las relaciones de dependencia entre las variables aleatorias.
- **Parte cuantitativa:** probabilidades a priori o condicionales de cada uno de los nodos que forman parte de la Red Bayesiana.

Para el análisis de la confiabilidad de este sistema, con base en RB, se proponen los siguientes pasos:

- 1) Definir los estados posibles de cada elemento.
- 2) Calcular la probabilidad de cada estado con base en los datos de confiabilidad de los elementos.
- 3) Construir el diagrama de la Red Bayesiana con base en las conexiones lógicas entre los elementos.
- 4) Definir la Tabla de Probabilidad Condicional para cada conexión del diagrama.
- 5) Calcular las probabilidades marginales de la red.

Para la implementación del modelo de calidad se utiliza un software especializado en la creación de Redes Bayesianas. El programa es “*Netica*” [12] de la empresa *Norsys software corp.* *Netica* es un programa para trabajar con redes probabilísticas y diagramas de influencia. Posee una interfaz para dibujar redes, y las relaciones entre las variables pueden ser ingresadas como probabilidades individuales, en la forma de ecuación o derivadas de bases de datos. Este *software* usa las redes para desarrollar distintos tipos de inferencia usando algoritmos matemáticos, basados básicamente del siguiente teorema:

## Teorema 1 [13]

Si se tiene una Red Bayesiana como la mostrada en la ilustración 17 y teniendo en cuenta el diagnóstico condicional completo de la distribución conjunta de los componentes afectados, dado “T” (es decir el completo set de probabilidades de la forma  $\{P(C_1, C_2, \dots, C_n | T)\}$ , sobre todo el complemento de los valores de las combinaciones de  $C_i$ ), las probabilidades de  $P(C_1, C_2, \dots, C_n)$  y las probabilidades de  $P(C_1, C_2, \dots, C_n | T')$ , entonces es posible calcular la completa distribución de probabilidad conjunta de  $C_i$  y T, y por consiguiente, todas las probabilidades correspondientes a estas variables. En particular, es posible calcular todas las probabilidades causales.

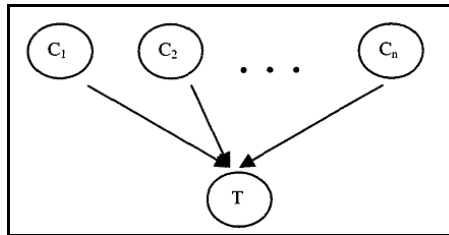


Ilustración 17 Red Bayesiana

Con esta herramienta es posible construir un modelo bayesiano, capaz de realizar razonamiento hacia “atrás” y hacia “adelante”.

- **Inferencia (de reglas) hacia adelante:**

Obtiene nuevos hechos a partir de la evaluación de reglas. Comienza insertando unos hechos iniciales en la base de hechos, se exploran las reglas de la base de conocimiento y se añaden hechos a la base de hechos; termina cuando no se cumple ninguna regla. El objetivo es deducir todo el conocimiento posible.

- **Inferencia (de reglas) hacia atrás:**

Deduca el conocimiento necesario para demostrar un hecho. Comienza fijando un hecho o meta a demostrar. Se busca la regla que contiene dicho hecho como consecuente y se demuestran los hechos del antecedente de la regla. El objetivo es demostrar una meta.

### 3.3.3 Trasfondo Matemático [14]

Denotando por  $C_i$  una causa por un comportamiento de la red; por  $S_j$  un síntoma que puede mostrar la calidad de la red; y por E el conjunto de N causas  $\{C_i\}$ . La probabilidad para que un síntoma ocurra dado un conjunto de causas observadas E es:

$$P(S_j / E) = \frac{P(S_j)P(E / S_j)}{P(E)}$$

Ecuación 1

Típicamente algunas condiciones son conocidas a priori como por ejemplo la categoría del terminal del usuario, la tecnología utilizada por el nodo B o cualquier otro conocimiento *a priori*. Se denota el conjunto de condiciones por D, lo que al agregarla a la ecuación 1 queda:

$$P(S_j / E, D) = \frac{P(S_j / D)P(E / S_j)}{P(E)}$$

Ecuación 2

Se asume en la ecuación 2 que las causas son independientes de las condiciones, cuando estas hipótesis no son verificadas, las condiciones debieran agregarse al término P(E). El proceso de cálculo final estará basado en la siguiente ecuación:

$$P(S_j / E, D) = \frac{P(S_j / D) \prod_{i=1}^N P(C_i / S_j)}{P(E)}$$

Ecuación 3

## 3.4 Modelo de Calidad de Servicio

### 3.4.1 Introducción

Generalmente los proveedores de servicios móviles de voz han basado sus mediciones en parámetros generales como cobertura de la celda y la capacidad para evaluar el rendimiento de la red. Para la caracterización en los servicios específicos, se usan mediciones como la tasa de falla de llamada (*drop call rate*), la tasa de bloqueo de llamada (*block call rate*) o la calidad de voz son usados. Las principales ventajas de este tipo de mediciones es de que son fácilmente obtenidas a través del monitoreo de red y generalmente son suficientes para obtener un buen parámetro del estado y de la experiencia del usuario.

Sin embargo este tipo de indicadores de voz están basados en las características específicas de tráfico de la conmutación de circuitos, cómo canales dedicados para cada usuario y sin corrección de errores en caso de *frame loss*. En el caso de los servicios de datos, las fuentes de tráfico presentan variados perfiles. Los usuarios pueden compartir los recursos del mismo canal de datos, la tasa de los canales asignados pueden cambiar de acuerdo a las condiciones de usuario y las retransmisiones pueden implementarse en caso de errores en la transmisión. La variabilidad en la distribución de tráfico hace difícil definir mediciones que puedan entregar al mismo tiempo el desempeño de la red y la percepción del usuario de cada servicio.



En las mediciones de datos es necesario producir un análisis más en detalle para poder diferenciar por separado los indicadores de red y de usuario. Sin embargo, el análisis no debe ser completamente independiente, es necesario establecer correlaciones entre las diferentes mediciones para poder así entender el comportamiento para ambos, la red y usuarios.

Esta parte de la memoria se enfoca en como el desempeño del usuario puede ser caracterizado a través de la influencia de los efectos de las diferentes capas de protocolo, tomando en consideración no sólo las características de los servicios sino también teniendo en cuenta la arquitectura y protocolos de la red inalámbrica.

### 3.4.2 Análisis de desempeño del usuario final

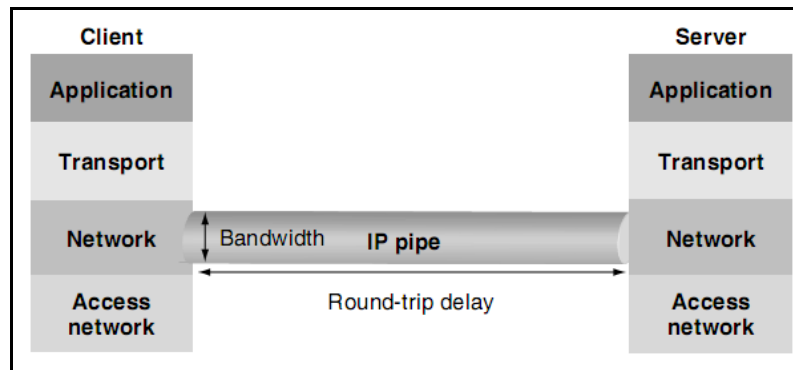
Se refiere a la Calidad de Servicio (QoS) que el usuario percibe al usar una aplicación. Sin importar la red inalámbrica en la cual se está basado la transmisión (por ejemplo GPRS, EDGE, CDMA2000, WCDMA o WiFi), las medidas que definen el desempeño de una aplicación están directamente unidas a la característica propia del servicio. [15]

Desde el punto de vista del usuario, toda la red puede ser considerada como una portadora de datos (*data bearer*, visto en la sección 2.2.1) la cual entrega determinadas capacidades de transmisión. Estas capacidades pueden ser definidas mediante la combinación de dos parámetros básicos: *throughput* y latencia. Sin embargo para poder hacer un completo análisis y definir la red es necesario considerar otros factores adicionales como la accesibilidad y la retención de las conexiones. Estos términos significan:

- **Throughput:** es la cantidad de información transferida en una dirección a través de un enlace dividido por el tiempo tomado para transferirla, expresado en bits o bytes por segundo. Generalmente el *throughput* en la interfaz de radio es medida como el rendimiento de la carga útil efectiva en el enlace de radio control.
- **Latencia (*latency*):** es el tiempo que demora un paquete atravesar una conexión de red desde el emisor al receptor. La latencia es particularmente importante para protocolos síncronos donde cada paquete tiene que ser reconocido antes que el próximo sea transmitido. Por ejemplo, establecimientos TCP y algoritmos de control de congestión son principalmente afectados por la latencia de la red.
- **Accesibilidad:** es la probabilidad de que existan recursos disponibles cuando un usuario lo requiera. En el caso de una red inalámbrica dependerá de diversos factores, desde la cobertura de la señal a la conexión de la red con nodos externos y servidores de aplicaciones. El acceso al servicio podría fallar en cualquier caso, algunos desde el interior de la red del operador, pero algunos otros por la misma red externa (ejemplo internet). Un operador de redes inalámbricas tiene que preocuparse de la optimización dentro su red, ya sea de la accesibilidad de radio como la accesibilidad de sesión.

- **Retención (retainability):** la mantención del servicio de la red está dada por la probabilidad de las conexiones de datos sean capaces para terminar su sesión exitosamente sin que la transmisión de errores afecten su desempeño. Desde el punto de vista del operador hay diferentes niveles de retención: *de radio y de sesión.*

La portadora de información entregada por la red está directamente conectada con los protocolos de transmisión de Internet, y es usado para crear un “tubo IP” que será usada para transmitir los datos de la capa de transporte y de aplicación. La ilustración 18 representa el tubo IP, donde el diámetro está determinado por el ancho de banda y el largo como el retraso de la portadora de datos.



**Ilustración 18 Vista del tubo de transmisión IP**

El punto clave para el análisis de cierto tipo de acceso de red es la separación entre los protocolos de aplicación y de transporte. Estos protocolos dependen del tipo de servicio y de la portadora de datos, los cuales a su vez dependen de la tecnología de transmisión usada. Desde el nivel IP hacia arriba, los efectos y degradación que pueden afectar al usuario son los mismos independientemente del sistema subyacente, y en la mayoría de los casos este desempeño puede ser caracterizado sólo basado en el tamaño del tubo IP que es provisto y de la demora del *round-trip* entre cliente y servidor.

Las redes celulares no implementan un enfoque *end-to-end* completo, ellas operan como un nodo adicional integrado en todo el Internet, donde el punto de acceso al usuario es un router (el GGSN) el cual separa el dominio Internet del dominio del operador. Dentro del dominio del operador, una serie de mecanismos dedicados para entregar garantía de QoS pueden ser aplicados de acuerdo a las especificaciones 3GPP y 3GPP2, pero parte del desempeño dependerá en la implementación de redes externas y de los protocolos usados.

La interfaz a la red externa desde el punto del modelo de capas es el nivel IP, el cual estará afectado por políticas de enrutamiento y de capacidades, pero el control de las capas de transporte y aplicación dependerá mas que nada en las configuraciones de los clientes, servidores y de las versiones de los protocolos usados.

El modelo desarrollado en este trabajo, no considerará los problemas de enrutamiento ni capacidades que se encuentran a nivel IP en la interfaz a la red externa. Para ello se definirán pruebas que sean independientes de la red externa, representando sólo a la red interna del operador.

De acuerdo con la división en el dominio del operador y el dominio externo, el desempeño de servicio puede ser hecho de dos perspectivas (ilustración 19):

- **Calidad de Servicio (QoS):** enfocada en cómo el servicio es desplegado desde un punto de vista de red. El QoS es definido por mecanismos y procedimientos entregados por la diferenciación de tráfico y asegurando ciertos requerimientos de calidad.
- **Calidad de Experiencia (QoE):** enfocada en cómo el servicio es percibido desde el punto de vista del usuario. Este tipo de acercamiento ve al servicio como un todo y se preocupa de cada posible aspecto que pueda afectar el desempeño.

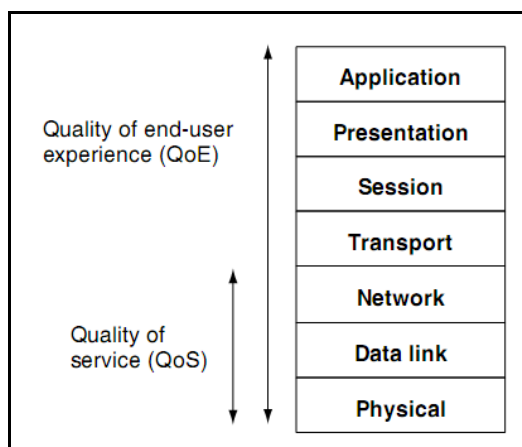


Ilustración 19 Performance del servicio

Para que el modelo sea útil para un operador móvil se usa el enfoque de mostrar un parámetro de calidad de experiencia por parte del usuario final, abarcando con ello todos (los más importantes) los factores que influyen en el servicio percibido.

### 3.4.2.1 Throughput

El *throughput* es uno de los indicadores más importantes del desempeño de usuario. Mide la velocidad en que el usuario es capaz de recibir y enviar datos desde y hacia la red. Es medido como la división entre la información transferida y el tiempo necesario para la transmisión, así cualquier retardo extra que es considerado en las mediciones (sumado a la transmisión en tiempo real) disminuirá el *throughput* percibido por el usuario final. Por esta razón tráfico tipo *bursty* (tipo ráfagas), los cuales tienden a

tener varias brechas entre los elementos transmitidos, usualmente logran obtener un bajo throughput al promediarlo sobre una sesión normal. Este es el caso de tráfico WAP (*Wireless Application Protocol*) o a nivel de tráfico HTTP (*HyperText Transport Protocol*).

Con lo anterior, la forma más precisa para medir el verdadero *throughput* entregado por la red desde un punto de vista de usuario es usar una fuente de datos que entrega una tasa constante de transmisión. Este el caso del protocolo FTP, el cual es comúnmente ocupado como referencia para cualquier *benchmarking* de *throughput*. Sin embargo FTP también tiene algunos retardos propios, debido principalmente a los establecimientos y procedimientos de TCP (*slow start*) los cuales aumentan un retardo constante al inicio de la transmisión y que afecta el *throughput* promedio.

La respuesta al problema anterior es usar FTP para grandes archivos, lo que hace que estas constantes de demora sean pequeñas en comparación con el tiempo total de transmisión, minimizando la degradación del *throughput* de aplicación. Como se ve en la ilustración 20 al momento de bajar un archivo la tasa de bajada no es la máxima posible instantáneamente.

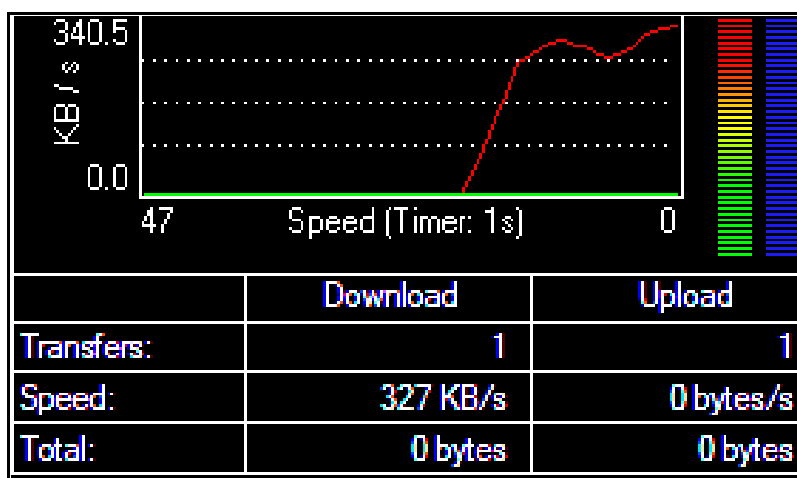


Ilustración 20 Efecto partida lenta TCP (*slow start*) medido en las pruebas

### 3.4.2.1.1 File Transfer Protocol (FTP) [17]

Es un protocolo de red para la transferencia de archivos entre sistemas conectados a una red TCP, basado en una arquitectura cliente servidor (por ejemplo Internet). Desde un equipo cliente se puede conectar a un servidor para descargar, enviar o manipular archivos. El servicio FTP es ofrecido por la capa de Aplicación al usuario utilizando los puertos 20 y 21.

Aplicación	FTP
Transporte	TCP
Red	IP

Tabla 8 Protocolo FTP

En el modelo FTP el usuario, inicia la conexión en el puerto 21. Las órdenes FTP que genera el usuario se transmiten al servidor a través de la conexión de control. Las respuestas estándar se envían desde servidor al usuario por la conexión de control como respuesta a las órdenes.

Las órdenes FTP especifican parámetros para la conexión de datos (puerto de datos, modo de transferencia, tipo de transferencia y estructura) y la naturaleza de la operación sobre el sistema de archivos (almacenar, recuperar, añadir, borrar, etc.). El proceso de transferencia de datos de usuario debe esperar a que el servidor inicie la conexión al puerto de datos especificado y transferir los datos en función de los parámetros que se hayan especificado.

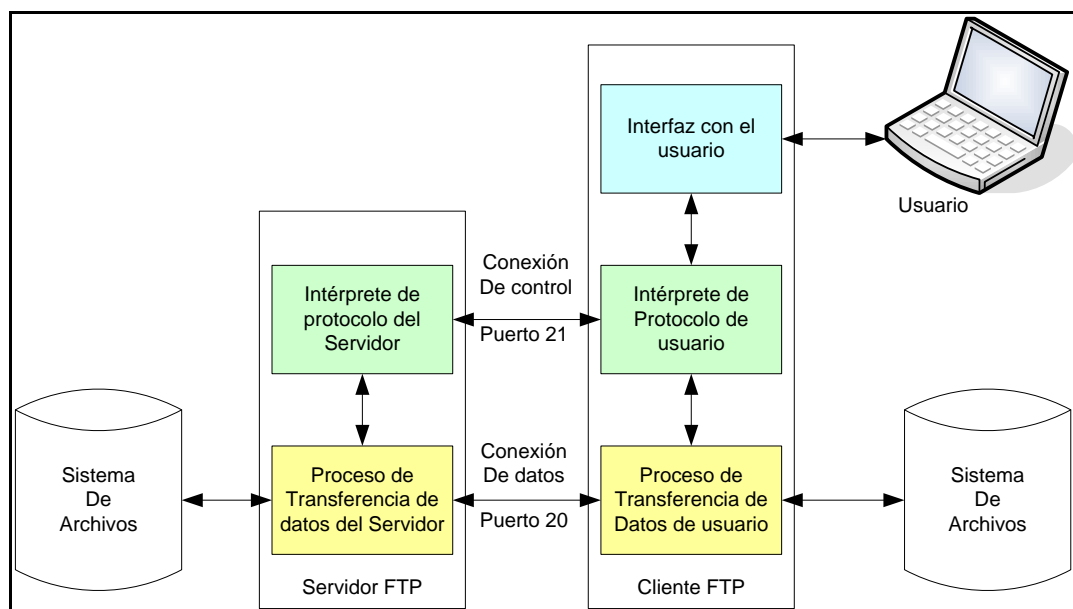


Ilustración 21 Diagrama servicio FTP

### 3.4.2.2 Caracterización del usuario final

Para poder obtener los factores que van a afectar al usuario es necesario definir un método de análisis. El elegido para este trabajo es el método con un enfoque *bottom-up*, partiendo desde el nivel más bajo de la arquitectura de capas y considerando una degradación acumulada del desempeño basada en los efectos de las diferentes capas y sus interacciones.

Aplicando el enfoque *bottom-up* de la capa física a la IP, los factores que determinan el throughput del usuario final en WCDMA son los de la ilustración 22.

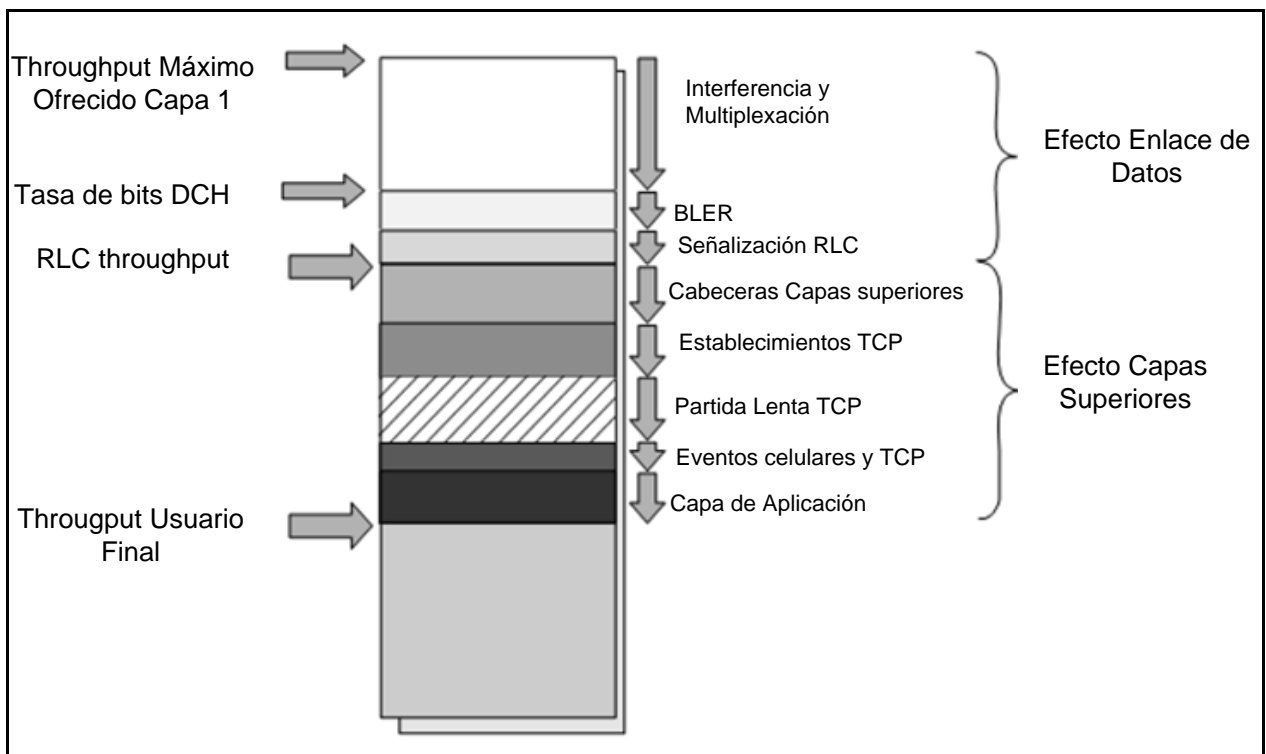


Ilustración 22 Fuentes de degradación del Throughput del usuario final

El *throughput* máximo es la tasa máxima de bits que la capa física puede entregar en condiciones ideales de la calidad de señal. En WCDMA está determinado por el *chip rate*, el *factor de spreading* (*Spreading Factor, SF*) del código de *spreading* usado y de la tasa de codificación efectiva [3].

El *throughput* ideal entregado por la Capa 1 (capa física) es considerado como el punto de inicio y luego la degradación del rendimiento introducido por cada capa superior es estimado. Esta estimación es hecha principalmente mediante las pruebas realizadas sobre la red, datos estadísticos y conocimiento teórico (ya sea de literatura o de conocimiento de expertos). La forma en que el desempeño de cierto servicio es degradado depende del tipo de prestación y de los factores a que es más sensible: retardo, tiempo de respuesta, pérdida de paquetes, etc. La ilustración 23 muestra las diferentes capas de protocolos de redes con tecnología WCDMA.

Desde el punto de vista del desempeño del servicio, los factores que producen la degradación del nivel de *throughput* pueden ser agrupados en efectos a nivel de enlace de datos y efectos de las capas superiores.

Como se dijo anteriormente debido a que en este trabajo se busca obtener el *throughput* del usuario, se analiza en detalle los servicios FTP (*File Transfer Protocol*), debido a que el rendimiento de este tipo de servicio depende principalmente del *throughput* final.

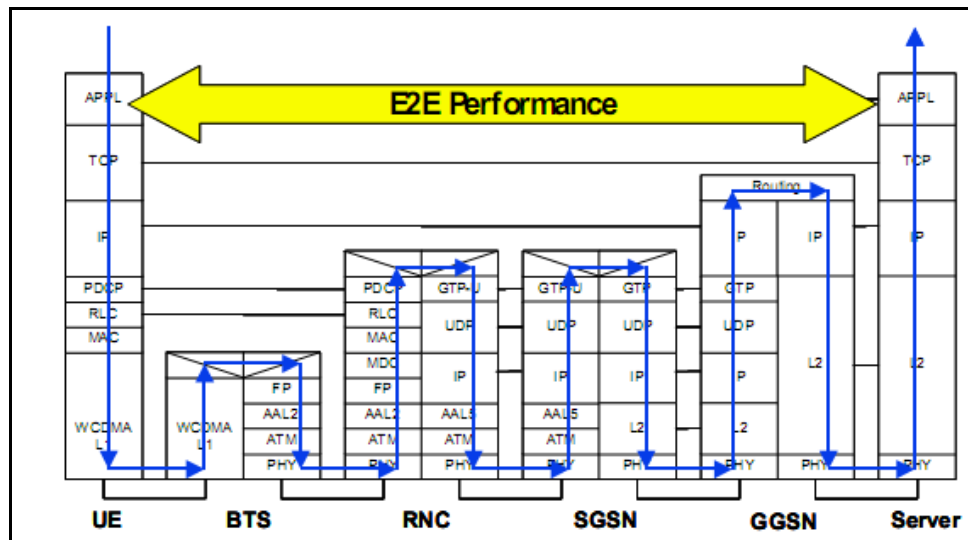


Ilustración 23 Capas que afectan el rendimiento del usuario final

Tomando en consideración lo anterior, la primera red bayesiana propuesta y la base a la red del modelo total va a ser la red que se muestra como diagrama en la ilustración 25. En esta red se muestran los dos nodos causales que van a afectar al síntoma (en este caso el *throughput* que recibirá el usuario) y sus relaciones causales. También se muestran los nodos que influyen en la capa de transporte y de aplicación. A continuación se explica en detalle cada nodo.

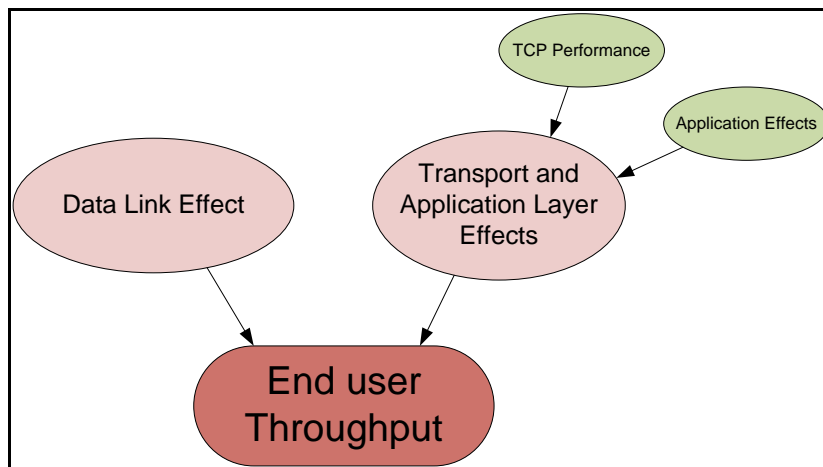


Ilustración 24 Red bayesiana primaria para obtener el throughput del usuario

- **End user Throughput:** está representado por el nodo “*HSDPA Throughput per user*”, que muestra el throughput esperado que recibe el usuario final. Este nodo es de naturaleza probabilística, el cual tiene 35 estados discretos. Cada estado posee un valor que está en kbps. Este nodo entrega la media del throughput esperado con su desviación estándar correspondiente. Este nodo depende de las variables “*Data Link Effect*” y “*Transport and Application Layer Effects*”.

- **Data Link Effect (Efectos del enlace de datos):** está representado en el *software* por el nodo “*Data Link Throughput per user*”, que muestra implícitamente el *throughput* ofrecido al usuario final por la red de acceso de radio a las capas de transporte y de aplicación. Este nodo es de naturaleza probabilística, el cual va a tener 36 estados discretos. Cada estado tiene un valor que está en kbps.

Este nodo entrega la media del *throughput* esperado con su desviación estándar correspondiente. Son factores que afectan el desempeño final del usuario y que dependen de las condiciones de red (como interferencia, cobertura, distribución de recursos, etc.). Los resultados de esta degradación es el *throughput* del enlace de datos el cual se refiere al ofrecido por el RAN (Red de Acceso de Radio) a las capas de transporte y de aplicación. Estos factores son analizados con mayor detalle en la sección 3.4.2.3.

- **Transport and Application Layer Effects (Efectos de las Capas de Transporte y de Aplicación):** está representado por el nodo “*Upper Layer Degradation*”, que muestra los factores que dependen de los protocolos de transportes y aplicación, estos factores son independientes de la tecnología de acceso. Este nodo es de naturaleza probabilística, el cual tiene tres estados discretos cualitativos (*Low*, *Medium* y *High*). Estos estados representan el grado de influencia de las capas de transporte y aplicación en el *throughput* final que recibe el usuario.

- **TCP Performance (Desempeño TCP):** está representado por el nodo “*TCP Performance*” y depende de los nodos “*Latency*”, “*Block Error Rate*” y “*Delay Spikes*”, los cuales son explicados en detalles en la sección 3.4.2.4. Este nodo posee los estados cualitativos *Good*, *Medium* y *Low*, representando la calidad del desempeño de la capa de transporte.

En este caso particular (también aplicado a *Web browsing*), FTP está basado en el protocolo de transporte TCP, donde los principales efectos se deben a la cabecera de los paquetes de datos (*overhead*), los establecimientos de las conexiones TCP y el *slow start* (partida lenta).

TCP continuamente controla las tasas de transmisión cuando se intercambia información entre un emisor y un receptor. El objetivo es utilizar completamente el ancho de banda sin congestionar la red cuando múltiples usuarios comparten recursos. Generalmente TCP funciona a través de los estados de adaptación mostrados en la ilustración 25, los cuales están descritos a continuación.

- *Sincronización (Synchronization):* en esta fase el emisor y el receptor negocian, por ejemplo, los tamaños de los *buffers*.
- *Partida lenta (Slow start):* el emisor aumenta gradualmente la tasa de transmisión cuando recibe reconocimiento del receptor.



- *Estado permanente (Steady state)*: el emisor transmite nuevos paquetes tan pronto que ha recibido los reconocimientos del receptor que el receptor está listo para aceptar nuevos paquetes

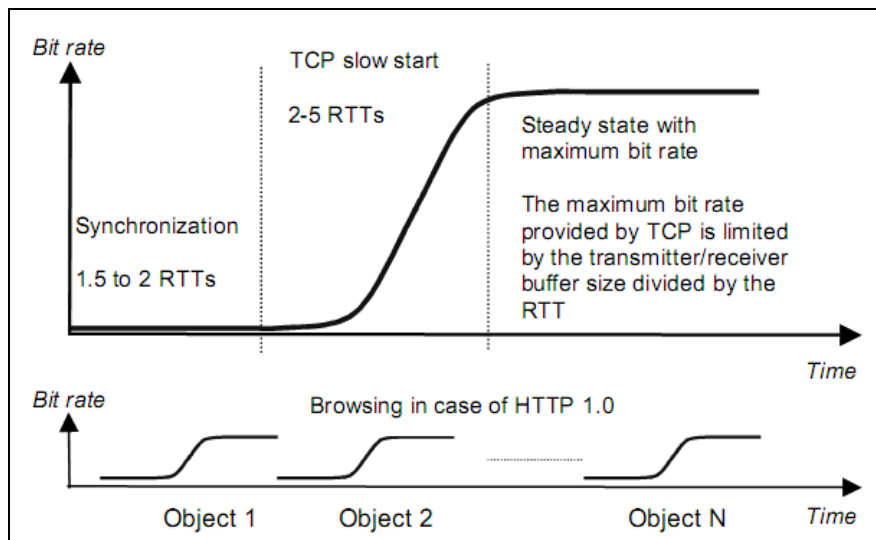


Ilustración 25 Tres diferentes estados de una conexión TCP/IP y la correspondiente tasa de bits

- **Application Effects (Efectos de la Capa de Aplicación)**: está representado por el nodo “*Application Layer Effects*”, que posee los estados cualitativos *High*, *Medium* y *Low* representando el nivel de degradación al *throughput* del usuario.

Desde una perspectiva del retardo, la capa de aplicación introduce efectos de degradación. Debido a que principalmente esta capa es responsable de establecer sesiones, procesar contenidos de aplicaciones o manejar conexiones de transporte necesarias, los retardos asociados a los procedimientos anteriormente nombrados tienen que ser considerados en el análisis del rendimiento de la calidad de servicio.

En los efectos de la señalización en los protocolos de aplicación, algunos servicios utilizan protocolos para establecer sesiones con un nodo remoto antes de que la información sea transmitida. Durante las sesiones, ambas entidades tienen que negociar algunos parámetros relacionados con la transferencia de información (por ejemplo *codecs*, el número de los puertos, etc.). Los retardos de los establecimientos de sesión para servicios FTP dependen principalmente de los retardos introducidos por los elementos de red y de la cantidad de PDP Context usados representados por los nodos “*Network elements delay*” y “*PDP Context usage*”, los cuales son explicados en detalles en la sección 3.4.2.4.

### 3.4.2.3 Efectos del enlace de datos

Para representar los efectos del enlace de datos se propone la red de la ilustración 26, donde se muestra las variables más importantes que influyen en el desempeño.

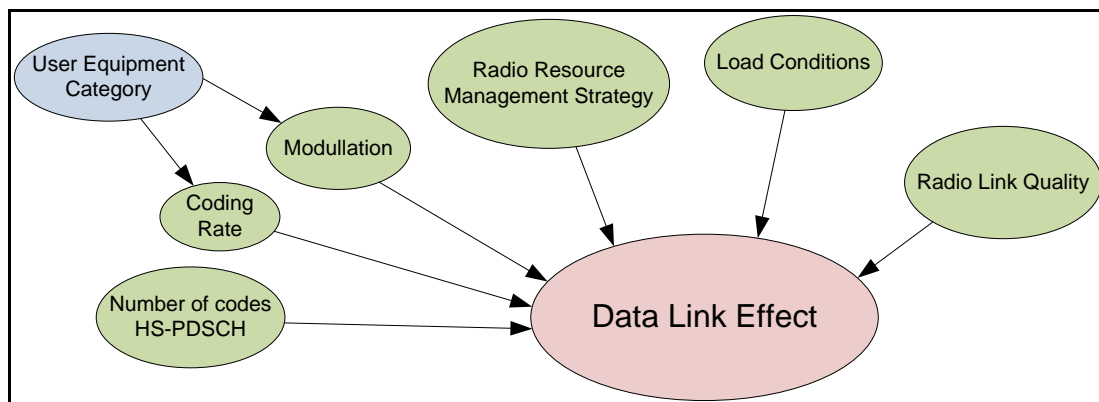


Ilustración 26 Diagrama efectos en el enlace de datos

Para poder entender esta red es necesario entender el comportamiento de la interfaz de radio, la cual se explica a continuación.

Primero, los paquetes IP provenientes del *core* son segmentados en unidades de carga útil de datos (PDUs) en el RNC, luego son enviados al Nodo B de acuerdo con el control de flujo de tráfico RLC. En el Nodo B, los PDUs son concatenados en bloques y enviados al UE a través de la interfaz aérea. Cuando los bloques son recibidos correctamente, son segmentados en PDUs y luego ensamblados en paquetes IP. [23]

Para flujos TCP el UE responde con ACKs a través del *uplink* de la interfaz aérea. Dependiendo de la velocidad en que los ACKs vuelven al emisor, a través de los estados de la red de acceso y del *core*, la tasa de bajada de los paquetes IP es regulada con los retrasos correspondientes a las especificaciones TCP.

La prioridad de encolamiento del Nodo B es actualizada de acuerdo a las llegadas de los PDU. Cada 2 ms, dependiendo de la información de la calidad del canal y del estado de encolamiento de cada UE, el *scheduler* determina que UE servir. De acuerdo a las funcionalidades de HARQ, los RLC PDU son encapsulados en bloques MAC, codificados y luego mapeados en los canales físicos. La probabilidad de falla de bloques es compuesta como una función de la calidad de canal y de los parámetros físicos. Para estimar el BLER se usa una tabla de valores obtenidos de [24], y así obtener el BLER como función del SNR y del CQI instantáneo.

La capa MAC de HSDPA tiene como funcionalidades el *scheduling* en el Nodo B y soportar los procesos HARQ entre el terminal y el Nodo B. La información enviada por

el canal de control tiene un encabezamiento de la capa MAC (como se muestra en la ilustración 27). La carga útil consiste en uno o más unidades de datos de servicio (SDUs) y posible relleno si no se logran los tamaños disponibles. Cuando se toman en cuenta los encabezamientos RLC/MAC y se fija el tamaño de la unidad de carga útil de datos (PDU) a 320 bits, el cual es el tamaño típico de PDU para el control del enlace de radio, se tienen las tasas en la capa RLC para diferentes terminales como se ve en la tabla 10. A nivel de aplicación la diferencia es menor que el 5% debido al *overhead* IP.

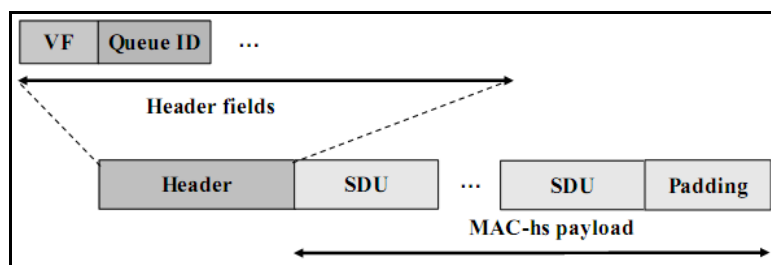


Ilustración 27 Carga útil de datos de MAC-hs

En UMTS es usado el control de potencia, en cambio en HSDPA se usa la adaptación del enlace (*link adaptation*). La variación de las condiciones del canal es controlada a través del uso de diferentes órdenes en la modulación y diferentes tasas de codificación. Así el número de canales, modulación, tasas de codificación y el tamaño de los bloques de transporte son seleccionados de acuerdo al indicador de la calidad del canal (CQI).

<i>TFRC</i>	<i>Modulation</i>	<i>Effective code rate</i>	<i>Max. throughput (Mbps)</i>
1	QPSK	$\frac{1}{4}$	1.8
2	QPSK	$\frac{2}{4}$	3.6
3	QPSK	$\frac{3}{4}$	5.3
4	16QAM	$\frac{2}{4}$	7.2
5	16QAM	$\frac{3}{4}$	10.7

Tabla 9 Tasas teóricas de bit con 15 multicódigos para diferentes TFRCs

<i>UE category</i>	<i>No. of codes</i>	<i>Modulation</i>	<i>RLC blocks per 2ms TTI</i>	<i>Transport block</i>	<i>Max. RLC data rate</i>
12	5	QPSK	10 × 320	3 440	1.6 Mbps
5/6	5	16QAM	21 × 320	7 168	3.36 Mbps
7/8	10	16QAM	42 × 320	14 155	6.72 Mbps
9	15	16QAM	60 × 320	20 251	9.6 Mbps
10	15	16QAM	83 × 320	27 952	13.3 Mbps

Tabla 10 Tasas de data a nivel del RLC para diferentes categorías de usuario y con tamaño de PDU de 320 bit

Para representar estos comportamientos en el diagrama de la ilustración 26 se plantean las siguientes variables:

- Modulation (Modulación):** la variable que representa la modulación está representada en el software por el nodo “Modulation Scheme”, que muestra la probabilidad del esquema de modulación utilizada (16 QAM y QPSK) por el UE. Esta variable es de naturaleza probabilística, el cual tiene 2 estados (MS 16 QAM y MS QPSK). Esta variable depende de la categoría del UE representado por el nodo “User Equipment Category”.

Mientras UMTS usa sólo la modulación QPSK en sus canales DCH, HSDPA usa además una modulación de mayor orden en su canal HS-DSCH, la modulación 16QAM. Las constelaciones de las dos modulaciones se muestran en la ilustración 28. Teniendo una mayor cantidad de puntos de constelación (16 en vez de 4) ahora 4 bits pueden ser llevados por símbolo en vez de 2 bits por símbolo con QPSK.

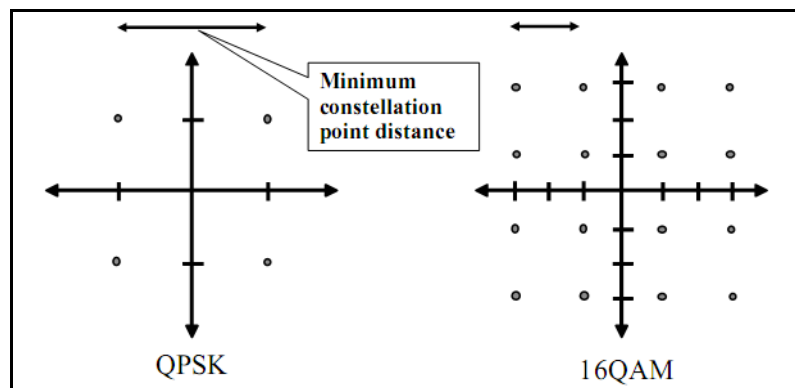


Ilustración 28 Diagramas de constelación para QPSK y 16QAM

Al usar un mayor orden de modulación se introducen límites de decisión adicionales. Con 16QAM, ya no es suficiente sólo saber correctamente la fase, sino también se necesita estimar la amplitud para una mejor estimación ésta. Esto explica porque la calidad de la señal necesita ser mejor cuando se usa 16QAM en vez de

QPSK. En el *downlink*, una buena calidad de señal permite una estimación del canal óptimo sin un excesivo *overhead*.

Dado que la modulación es menos robusta para canalizar las deficiencias, se combinan estas modulaciones con la característica de adaptación del enlace. La modulación adaptable y la codificación de canales son aplicadas al intervalo de transmisión basado en el CQI observado por el UE.

- **Number of codes HS-PDSCH (Número de códigos HS-PDSCH):** está representado por el nodo "*Number of codes HS-PDSCH*" que muestra la cantidad esperada de códigos usados en el canal HS-PDSCH, además de la desviación estándar. Es de naturaleza probabilística, con los estados *High* y *Low*. Esta variable va a depender de la categoría del UE representado por el nodo "*User Equipment Category*".

El canal de bajada HS-DSCH puede usar multi códigos, con un factor de *spreading* de 16, pero debido a que los canales comunes y los DCHs asociados necesitan espacio, el número máximo de códigos posible son 15. Si un terminal puede recibir hasta 15 códigos durante los TTI de 2ms, depende de las capacidades del terminal, visto en la tabla 10.

- **Load Conditions (Condiciones de Carga):** está representado por el nodo "*HSDPA users*" que muestra la cantidad de usuarios que ingresan en la celda, ocupando el servicio FTP del sistema HSDPA. Este nodo posee cuatro estados, que representarán el número de usuarios (cuatro en total) que se activarán en la celda. Se decide trabajar hasta cuatro usuarios debido a que el promedio de usuarios ocupando HSDPA en una celda es de 3 usuarios activos.

Esta variable influye principalmente a la congestión de red y el *throughput* que recibe cada usuario a nivel de enlace de datos. La primera característica está representada con el nodo "*Interference*" (el cual muestra el nivel de interferencia en la celda, con los estados *Low*, *Medium* y *High*) y la segunda con el nodo "*Data Link Throughput per user*" (explicado en la sección 3.4.2.2).

En el sistema también puede haber otro tipo de tráfico que se encuentra consumiendo espacio de códigos (por ejemplo conversación CS o video llamadas) que no pueden ser mapeadas en HSDPA. Se puede ver en la ilustración 29 el principio de variabilidad de la tasa de bits que va a tener un usuario, la cual va a variar el nivel de potencia. Así, la gestión de los recursos de radio determinará el espacio disponible de códigos para el *scheduler* en la BTS como se ve en la ilustración 30, donde se puede ver el comportamiento que van a tener cuatro usuarios usando distintos servicios. En este caso los servicios son mezclados a través de la potencia con diferentes códigos.

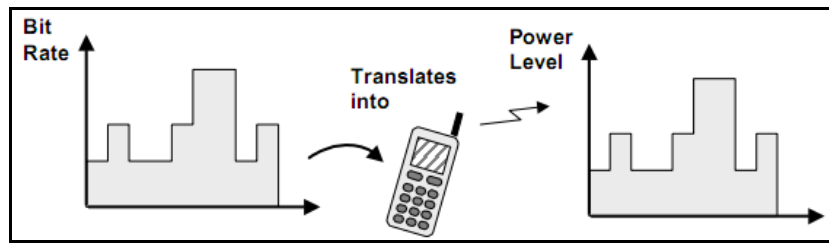


Ilustración 29 Flexibilidad de la tasa de bits.

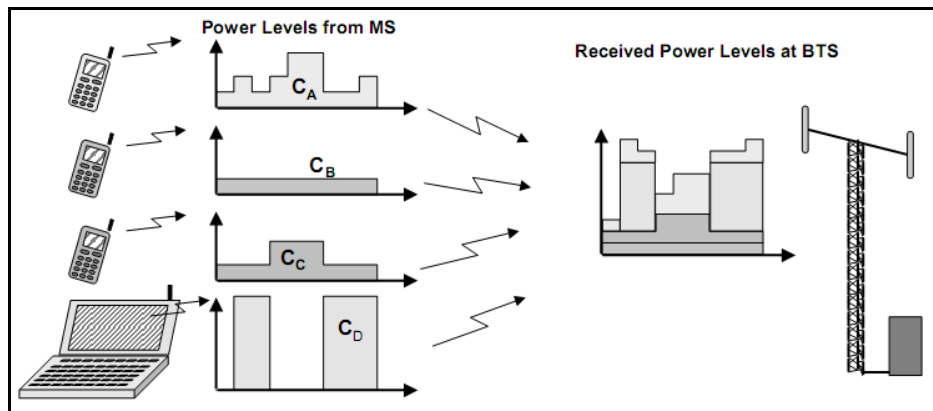


Ilustración 30 Multiplexación de servicios de distintas tasas de bits.

Los ejemplos para tasas de bit para diferentes combinaciones de parámetros sin incluir los *overhead* para diferentes formatos de transporte y combinaciones de recursos (TFRCs) se pueden ver en la tabla 9. La columna *effective code rate* (tasa de codificación efectiva) entrega el porcentaje de la cantidad total de información que es útil (que no es redundante). Si la tasa de codificación es  $k/n$ , para cada  $k$  bits de información útil, los códigos generan un total de  $n$  bits de información, donde  $n-k$  bits son redundantes.

- **Radio Resource Management Strategy (Estrategia de Gestión de los recursos de Radio):** principalmente está representado por el nodo “*Scheduling*” que muestra el tipo de scheduling implementado, tiene el objetivo de manejar la asignación de los recursos. Es un nodo de naturaleza probabilística, con los estados *Round Robin* y *Proportional Fair*, algoritmos estudiados en esta memoria (ver sección 2.3.2.1.).

El nivel de throughput en el enlace que puede ser logrado por el usuario es una función de los recursos asignados (definidos por las funciones del *scheduler*), la interferencia del ambiente (por ejemplo los usuarios que se encuentran al borde de la celda pueden tener menor *throughput*) y la calidad fijada (BLER). El BLER es un análisis de las transmisiones de errores en la interfaz de radio.

En este contexto si el BLER fijado es muy restrictivo, es necesaria mayor potencia, lo que disminuye el throughput del sistema (o la capacidad), debido al hecho que la potencia es un recurso limitado. En cambio, si el BLER fijado es muy alto, son

necesarias muchas retransmisiones, las cuales consumen recursos. Tomando en consideración que las retransmisiones degradan el desempeño del usuario, ajustar un BLER adecuado involucra un intercambio implícito entre la calidad y capacidad del sistema. Este indicador está representado por el nodo "BLER" el cual muestra la tasa de errores de los bloques. Este nodo posee los estados cualitativos *High*, *Low* y *Medium*, donde a cada estado se le asocia un porcentaje de error, entregando la media esperada del porcentaje.

El *scheduler* del nodo B puede asignar las tasas de datos para un solo usuario para obtener una conexión con una alta tasa constante de bit o para múltiples usuarios cuando el promedio de la tasa de datos es dividida entre el número de usuarios compartiendo los recursos (tomando en cuenta de que al borde de la celda las tasas están más restringidas que en las ubicaciones cercas al nodo).

- **Radio Link Quality (Calidad del enlace de Radio):** está representado principalmente por los nodos "*Channel*" (canal) y "*Signal-to-Interference plus Noise Ratio*" (Relación señal a interferencia mas ruido, SINR).

El nodo "*Channel*", posee los estados cualitativos *Good*, *Medium* y *Bad*, que representan la calidad del canal físico. Es una variable causal de los nodos "*CQI*", "*SINR*", "*Ec/No*" y "*RSCP*"; y depende de los nodos "*Interference*" (ver nodo "*Load Conditions*") y "*Path Loss*" explicados a continuación.

El nodo "*CQI*" representa la variable del mismo nombre (*Channel Quality Information*, información de la calidad de canal). Es una medida de la calidad de los canales de comunicación inalámbricos, con los estados cualitativos *High*, *Low* y *Medium*, donde a cada estado se le asocia un valor (ver apéndice D), entregando la media esperada con la desviación estándar correspondiente, un alto valor indica un canal con alta calidad y un bajo lo contrario. Principalmente el CQI le dice al *scheduler* del Nodo B la tasa de transferencia que el terminal espera poder recibir en un cierto instante de tiempo.

En la realidad, las condiciones del canal varían de celda en celda y hasta dentro de ellas. En efecto, elegir un modelo específico de multi trayectoria para el canal, usualmente usado en modelaciones, no es ideal. Por esta razón se usó dos nodos para representar la condición instantánea del canal (*RSCP* y *Ec/No*), con el objetivo de poder ver la condición esperada del canal o de representar las características de una celda en particular. A continuación se explican estos dos nodos.

El nodo "*RSCP*" (*Received Signal Code Power*), es la potencia recibida en el canal piloto (CPICH) medida por el UE. Este indicador muestra la estimación de la pérdida por la trayectoria (*path loss*), lo que entrega información sobre la cobertura de la red. Este nodo posee los estados cualitativos *Good*, *Medium* y *Bad*, los cuales tienen asociados un valor aproximado en dB (ver apéndice D). Este nodo va tener como nodo causal la variable "*channel*".

El nodo “*Ec/No*” (*Chip Energy over Noise*) es la energía por chip recibida dividida por la densidad de potencia en la banda. Este parámetro es la medida del UE más importante en WCDMA para la planificación de la cobertura de red, principalmente gracias al buen grado de precisión, ya que puede ser medido en la banda base. Este nodo posee los estados cualitativos *Good*, *Medium* y *Bad*, los cuales tienen asociados un valor aproximado en dB (ver apéndice D). Este parámetro va tener como nodo causal la variable “*channel*”.

El nodo “*Path Loss*” (pérdida en la trayectoria) posee los estados cualitativos *High*, *Low* y *Medium* que van a representar el nivel de degradación de la densidad de potencia (atenuación) de la onda electromagnética cuando se propaga a través del espacio, debido a las características del ambiente en donde se encuentra el UE y dependiendo de la cobertura de la señal de radio (representada por el nodo “*Radio Coverage*”). El nodo “*Radio Coverage*” va a poseer los estados “*City*”, “*Tunnel*” y “*Elevator*” representando posibles escenarios para el UE.

- **Load Conditions:** está representado por el nodo “*HSDPA users*” que muestra la cantidad de usuarios en la celda, ocupando el servicio FTP del sistema HSDPA. Posee 13 estados, representando cada estado la cantidad de usuarios compartiendo los recursos de red. Esta variable influirá principalmente a la congestión de red y el throughput que recibirá cada usuario a nivel de enlace de datos. La primera característica está representada con el nodo “*Interference*” (el cual muestra el nivel de interferencia en la celda, con los estados *Low*, *Medium* y *High*) y la segunda con el nodo “*Data Link Throughput per user*” (explicado en la sección 3.4.2.2).

#### **3.4.2.4 Efectos capa de transporte y de aplicación**

En el caso de nivel de transporte se analiza el protocolo TCP debido a su típico uso. El desempeño del *throughput* en TCP es sensible a las características del enlace de comunicación. Algunos de los factores importantes que la afectan es la latencia, la pérdida de paquete y el tamaño de la tasa de datos, viéndose sus efectos en el control de congestión y en los algoritmos de retransmisión. Claramente el comportamiento de redes inalámbricas difiere en gran medida de las alámbricas. Las características de la capa de enlace de las redes inalámbricas tienen importantes efectos en TCP y el desempeño de las capas de aplicación. Grandes latencias, tasas de datos variables, asimetría, *delay spikes* (aumentos repentinos de la latencia de la red), pérdida de datos u oscilaciones del ancho de banda son algunos de los más importantes. De ahí la importancia de entender las interacciones de estos factores con el protocolo para poder realizar mejoras y disminuir cualquier degradación. Así la tecnología de radio implementada tiene un gran impacto en estos factores.

Para representar los efectos de la capa de transporte y de aplicación se propone la red de la ilustración 31, donde se muestran las variables más importantes que influyen en el desempeño. Los nodos del diagrama “*TCP performance*” y “*Application Effects*” son explicados en la sección 3.4.2.2.



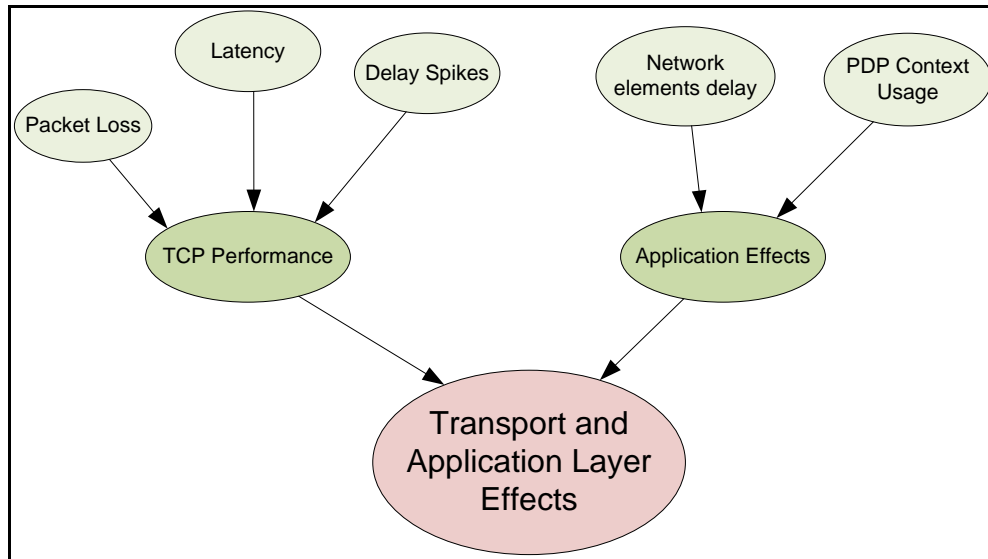


Ilustración 31 Diagrama de variables que afectan el desempeño de las capas superiores

A continuación se explica el diagrama y sus principales componentes.

- “Packet Loss” (Pérdidas de paquetes):** las pérdidas de paquetes en *wired networks* ocurren principalmente debido a desbordamiento en el buffer debido a condiciones de carga altas. En cambio, las redes inalámbricas tienen errores en el enlace de radio (*Bit Error Rate*). A pesar de que los métodos de corrección de errores (principalmente técnicas ARQ y *Frame Error Correction*) pueden minimizar errores no detectados, otros no pueden ser corregidos, lo que lleva a un BLER residual. En el modelo está representado por el nodo “BLER” explicado en la sección 3.4.2.3. (nodo Radio Resource Management Strategy).

- “Latency” (Latencia):** los mecanismos de partida lenta de TCP afectan el rendimiento *end-to-end* en gran medida cuando el RTT es relativamente alto, como es el caso de las redes celulares. Este gran retraso puede ser causado debido a la larga retransmisión y procesos en el RAN y Core Network. Está representada por el nodo “Latency” que posee los estados cualitativos *High*, *Medium* y *Low*, los cuales muestran el nivel de latencia de la red completa. Esta variable depende de los nodos “Latency RAN” y “Latency Core” que representan la latencia introducida por la red de acceso y el *core network* respectivamente, teniendo los estados *High*, *Medium* y *Low*, representando el grado de latencia. A su vez estos nodos son dependientes de la retransmisión de paquetes. Esta característica está representada por el nodo “Packet Retransmisión Core”.

La latencia puede ser medida como *round trip time* (RTT), que está definida como el tiempo en que un paquete IP demora en viajar desde el terminal a través de los elementos de red al servidor de la aplicación correspondiente, y volver al terminal. Si el

tamaño del paquete IP es pequeño, la tasa de información no afecta el retraso, entonces el retraso solamente es definido por los retrasos producidos por la estructura del sistema, los elementos de red y por las interfaces.

La evolución del RTT se muestra en la ilustración 32. El retraso principalmente es causado por los elementos de radio e interfaces, mientras que el retraso producido por el *core* es pequeño. En la memoria se trabaja solamente con HSDPA que son aproximadamente 70 ms de latencia, donde el *core* aporta solo el 7% de todo el tiempo. A nivel de la capa MAC el RTT con HSDPA y HSUPA es muy pequeño, aproximadamente de 10 ms y el RTT total principalmente depende de los retrasos en los procesos de los elementos de red y del UE.

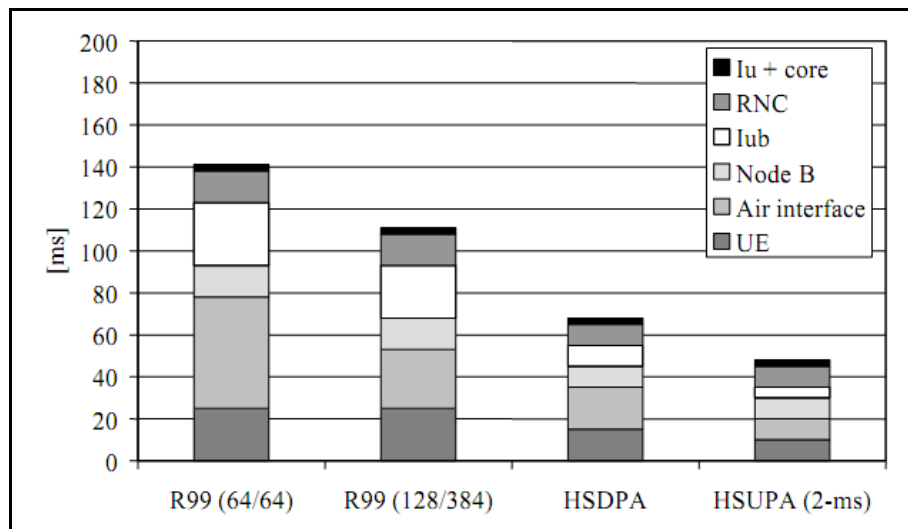


Ilustración 32 Evolución estimada del Round Trip Time (RTT).

- **Delay Spikes:** un delay spike es un aumento repentino de la latencia en el enlace. Está representado por el nodo del mismo nombre, posee los estados cualitativos *Low*, *Medium* y *High*, que muestran el grado de ocurrencia de aumentos repentinos de la latencia. Un terminal móvil puede sufrir retardos repentinos a causa de eventos como:

- Mala calidad en el enlace que incrementa el retardo debido a retransmisiones de RLC (Radio Link Control); también pérdidas de cobertura de radio (por ejemplo manejando en un túnel o dentro de un ascensor). Estos sucesos están representados por el nodo “*Quality of Link*” (calidad del enlace), el cual depende de los nodos “*RLC Retransmissions*” y “*Radio Coverage*”.
- La transmisión se detuvo al pasar de una celda a otra (en este trabajo no tiene mayor importancia debido a que se decidió no considerar los *Handover*, basado en estudios de mercado que indican que el porcentaje de usuarios que ocupan la

red HSDPA en condiciones en movimiento es muy pequeño en comparación a los usuarios estáticos).

- Repentino aumento del delay en la transmisión puede causar falsos cortes TCP, desencadenando retransmisiones innecesarias y produciendo nuevas fases de partidas lentas. Este evento está representado por el nodo “*Transmission stopped*” (corte de la transmisión), con los estados *True* y *False*, donde el primer estado se representa cuando existe un correcta transmisión de datos y el segundo representa el evento contrario

En la tabla 11 se puede ver un pequeño resumen del impacto en el TCP dependiendo de las características de la red.

Indicador	Wired	Wireless	Efectos en TCP
Latencia	baja latencia en general	alta latencia, mayormente debido a retrasos en el RAN o CN	grandes establecimientos de conexión TCP y baja recuperación del slow start
Pérdida de paquetes	baja pérdida de paquetes (sólo debido a desbordamiento de buffer)	puede ser atribuido a la corrupción (BLER) en vez de la congestión	tres ACKs iguales consecutivos generan retransmisiones TCP
Delay Spike	bajos delay spikes	importantes delay spikes debido a los diferentes procedimientos inalámbricos	pueden causar falsos TCP <i>timeout</i> desencadenando retransmisiones innecesarias
Tasa de datos	altas tasas	bajas y dinámicas tasas de datos	subutilización del enlace de radio y TCP <i>timeouts</i>

Tabla 11 Características de redes e impacto en TCP

- **Network elements delays (retardos producidos por los elementos de red):** Está representado por el nodo “*Network Elements Delay*”, que posee los estados cualitativos *Low*, *Medium* y *High*, los cuales representan el grado de retardo introducido por los elementos de red (por ejemplo *Firewall*). Procesar los retardos en los diferentes elementos de red afectan considerablemente la negociación *end-to-end*. Especialmente, cuando IMS toma parte en la negociación, el total del retardo de red aumenta durante esta fase.

- **PDP Context usage (cantidad de PDP Context requeridos):** Está representado por el nodo del mismo nombre, posee los estados cualitativos *Low* y *High*. Mientras mayor sea el número de *PDP Contexts* requeridos por la aplicación, mayor va a ser el retardo total del establecimiento de la sesión.

### 3.4.3 Factores generales de rendimiento para HSDPA

Para poder modelar un sistema complejo como lo es HSDPA es necesario poder reconocer las partes vitales y la importancia de éstas para realizar las hipótesis sobre el rendimiento de la red. El desempeño de HSDPA depende significativamente de los parámetros de despliegue y de servicios, y cada uno varía significativamente dependiendo del escenario. Algunas de las condiciones más importantes para el rendimiento de HSDPA se refieren a:

- **Algoritmos de red:** algoritmos específicos de HSDPA como el *MAC-hs packet scheduler*, *adaptación del enlace HS-DSCH (High-Speed Downlink Shared Channel)*, *HS-SCCH (High-Speed Shared Control Channel) power control*, y la asignación de recursos de transmisión.
- **Características del escenario:** los niveles de interferencia en la celda definidos por factores como pérdidas de propagación, patrones de movimiento y propagación de multitrayectorias.
- **Características y capacidades de los terminales:** tasas peak de transferencias, cantidad de códigos en el canal HS-PDSCH, número de antenas transmisoras y receptoras, y algoritmos receptores de banda base.
- **Tráfico y calidad de servicio:** tráfico adecuado de HSDPA, número activo de usuarios y sus correspondientes requerimientos de QoS.

### 3.5 Modelo implementado

Después de hacer el estudio de los factores que afectan el rendimiento de la tecnología HSDPA, las relaciones entre las variables y de los factores principales que afectarán la calidad de servicio recibido por el usuario en la sección 3.4.2 se propone el diagrama de relaciones de la ilustración 33 que se implementará en el modelo final.

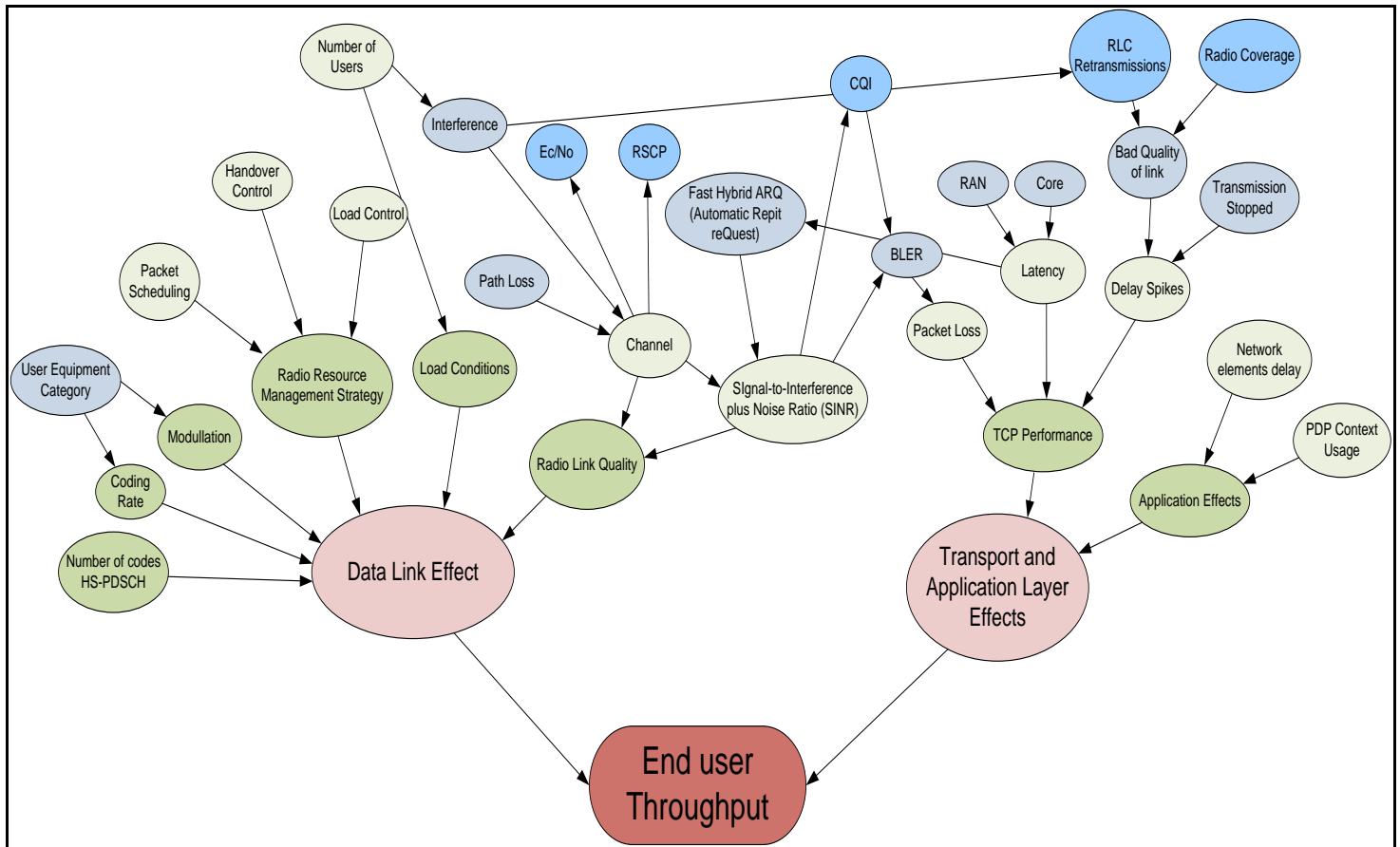


Ilustración 33 Diagrama Modelo de calidad de Servicio

En la ilustración 34 se muestra la implementación en el *software* del diagrama de la ilustración 33. Se muestran todas las variables que componen el modelo, con sus respectivos estados. Las barras representan las probabilidades que la variable se encuentre en ese estado (las probabilidades de los estados suman en total 100). Cada nodo, con sus características particulares, se encuentra explicado en la sección 3.4.2.

En total este modelo está compuesto por 38 nodos, 47 enlaces y 8502 probabilidades condicionales.

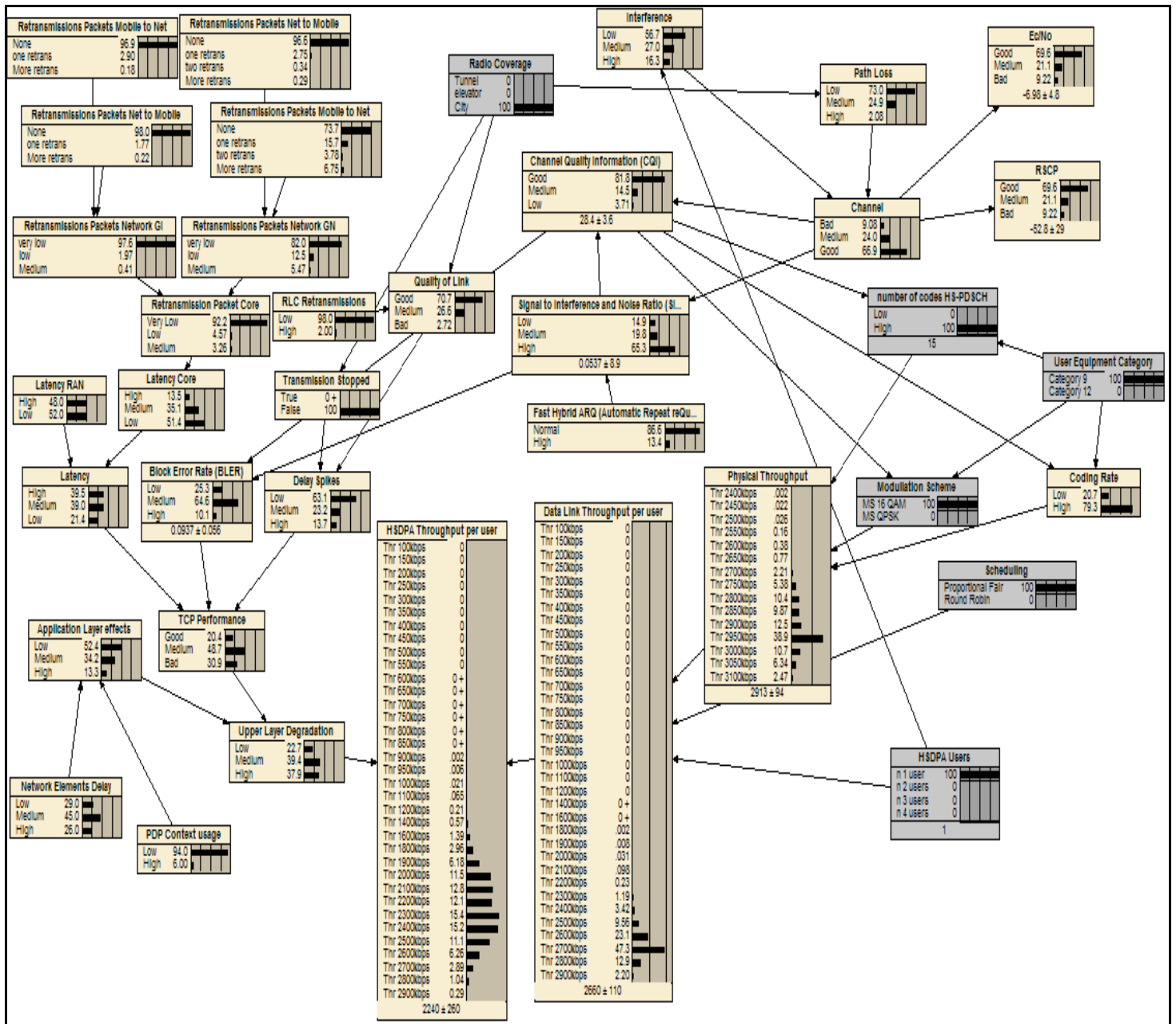


Ilustración 34 Modelo de Calidad de servicio para una red de datos HSDPA

### 3.6 Indicador de calidad de servicio FTP

Como se ha mencionado, para los operadores móviles es de gran importancia entregar una buena calidad de servicio para que el usuario tenga una buena percepción del uso del servicio. Generalmente el operador ocupa la cadena de procesos de la ilustración 36 para el desarrollo de su red, pudiendo cumplir con los requerimientos deseados y entregar una buena calidad de servicio.

El proceso seguido por el operador comienza con estudios por parte del área de Marketing, se analizan las normas sobre QoS y las características de red existentes. Se generan requerimientos para el área de Planificación, los cuales harán un plan de inversión (Inv) para poder desarrollar uno o más proyectos. Una vez aprobados son implementados por el área de Operaciones y Mantenimiento (O&M). Los proyectos son controlados por el área de Calidad, encargándose de medir el nivel de QoS entregado. Si no es satisfactorio el QoS, el área de Optimización (OPP) realizará las modificaciones correspondientes en la red, necesitando una nueva inversión y volver a realizar de nuevo los procesos. El proceso está esquematizado en la ilustración 35.

El modelo implementado en esta memoria ayuda, además de predecir el *throughput* del usuario, predice el indicador de calidad de servicio (SQI), en especial para FTP. Al poder predecir el SQI se reduce la transición de procesos y se reducen los costos totales en el despliegue de la red. También con este modelo se pueden ver los factores más importante que influyen en el QoS recibido por el usuario, evitando invertir en factores que no van a tener un mayor impacto en la percepción de usuario.

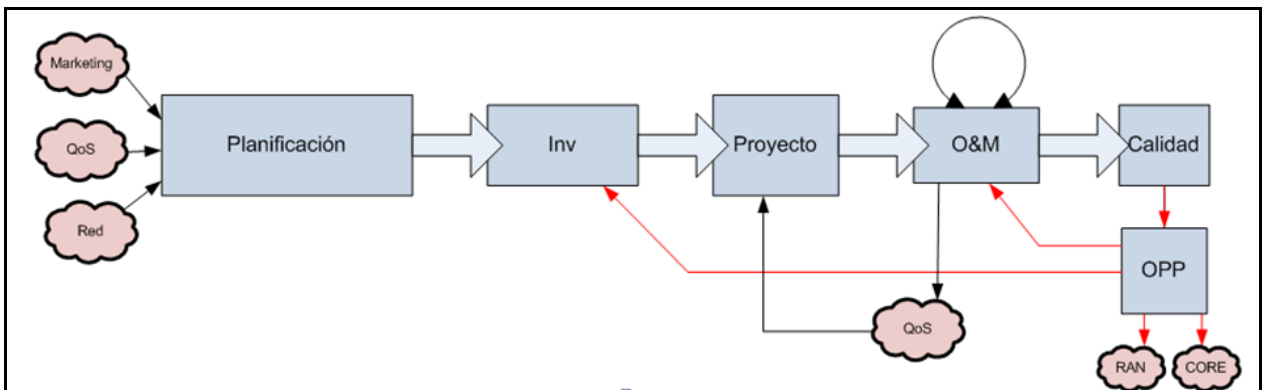


Ilustración 35 Cadena de procesos para el desarrollo de una red

#### 3.6.1 Metodología para la definición de indicadores de desempeño (KPI)

La metodología para la definición de KPIs que se usa en el modelo está basada en las recomendaciones derivadas de las Especificaciones que definen dos niveles separados de KPIs:

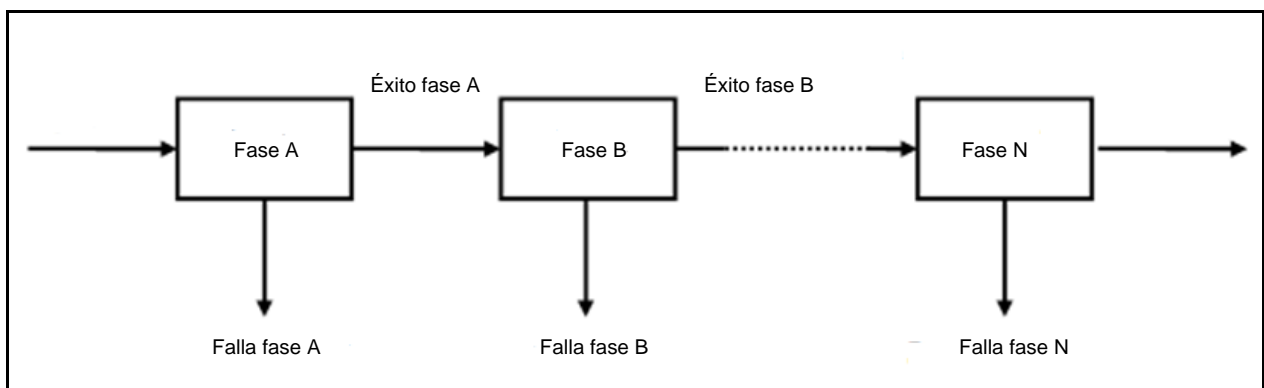
- KPIs de usuario final, los cuales describen la experiencia del usuario relativo al servicio entregado (por ejemplo el tiempo en descargar un archivo)
- KPIs de Red, que están enfocados en parámetros de red e indicadores técnicos, los cuales están conectados con la experiencia del usuario (ejemplo *throughput*).

La definición ITU de calidad de servicio (QoS) y de performance de red se resume en [16]:

- QoS, es el efecto global del desempeño del servicio y determina el nivel de satisfacción del usuario. Está enfocado en los eventos observables del usuario y es medido en el punto de acceso.
- Desempeño de red, es la habilidad de la red de entregar las funciones relativas a las comunicaciones. Es la parte técnica del QoS y está enfocado en los eventos técnicos y pueden ser medidos en cualquier punto intermedio de la red.

En este contexto, el término de QoS se refiere a la directa percepción de usuario de un servicio y debe ser medida para caracterizar la experiencia del usuario. En un segundo paso, los indicadores de desempeño de la red tienen que ser considerados y conectados para poder mejorar la calidad percibida. Usualmente, los parámetros de desempeño de la red son más fáciles de medir que los parámetros de QoS, pero ellos no están relacionados a la experiencia de usuario.

La siguiente ilustración entrega el enfoque ITU (International Telecommunications Union) para definir los KPIs de los usuarios finales: toda la sesión (en este caso FTP) es dividida en diferentes fases, las cuales son las únicas fases que experimenta directamente el usuario.



**Ilustración 36 Modelo de sesión para un servicio genérico**



Para evaluar cada fase se utilizan tres criterios:

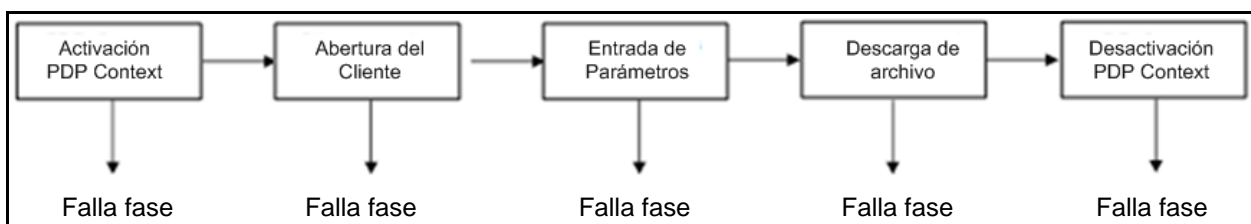
- **Velocidad:** este parámetro representa la velocidad percibida por el usuario para cada una de las varias fases que componen un servicio: prácticamente es el tiempo necesitado para llevar a cabo una cierta fase de un servicio.
- **Éxito:** describe la capacidad, para una cierta fase de servicio, para llegar al final de la fase (tasa de éxito= número de intentos/ número total de intentos), además de la velocidad y de la precisión. Es importante hacer notar que para servicios de datos a diferencia de servicios de voz, la accesibilidad puede ser mezclada con la fiabilidad: un usuario no tiene conocimiento si el fracaso de una fase depende de los problemas en el acceso o en el desarrollo de la misma fase.
- **Precisión:** tomando en cuenta que la fase alcanzó su fin, la precisión describe si la fase ha terminado correctamente, es decir sin errores o algún comportamiento anormal. Prácticamente se refiere a la fidelidad y a la integridad para llevar a cabo una determinada fase de servicio.

Este criterio de evaluación, aplicado a todas las fases, entrega un completo conjunto de KPIs, los cuales caracterizan la experiencia del usuario en un cierto servicio. Se usará un enfoque matricial (filas= criterios, columnas=fases de servicio) el cual representa una forma sistemática para definir KPIs de usuario final, dentro del marco definido por la ITU y ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*): empezando de estos resultados, serán analizados los KPIs de red que afectan directamente la experiencia de usuario.

### **3.6.1.1 Definición y Medición de KPI de usuario final**

La metodología anteriormente descrita está aplicada para definir los KPIs del usuario final para *Web browsing*, *e-mail*, *WAP (Wireless Application Protocol)*, *FTP*, etc. Para cada servicio existe un modelo de sesión estándar; el criterio de evaluación es aplicado a cada fase en orden de definir los KPIs; como segundo paso sólo fue tomado en cuenta las fases que afectan a la red.

Tomando en cuenta lo explicado en la sección 3.4.2.1.1 donde se muestra la arquitectura del servicio FTP, un posible modelo para una sesión, reportando todas las fases percibidas por el usuario, es descrito en la siguiente figura:



**Ilustración 37 Modelo de sesión FTP**

La siguiente tabla entrega las fases más importantes y la aplicación de los criterios de velocidad, fiabilidad y precisión.

	Activación PDP Context	Descarga de archivo	Desactivación PDP Context
Velocidad	Tiempo de activación PDP Context	Tiempo de descarga de archivo	Tiempo de desactivación PDP Context
Éxito	Tasa de éxito de activación PDP Context	Tasa de éxito de descarga de archivo	Tasa de éxito de desactivación PDP Context
Precisión	NA	Evaluación de error en descarga	NA

**Tabla 12 KPIs usuario final para servicios FTP**

### 3.6.1.2 Metodología de valoración de KPI

En esta sección el servicio FTP es analizado en detalle considerando el enfoque matricial de la ilustración 3.6.1 que relaciona los criterios de usuario (velocidad, éxito y precisión) con las fases del servicio. Por eso para un modelamiento aproximado se le asignaron diferentes valores (*high, medium, low*), basado en la importancia esperada de cada criterio en las fases que tiene FTP. Esta asociación es cualitativa siendo la forma elegida para trabajar permitiendo con esto enfocarse en las fases y criterios que son realmente importantes desde el punto de vista del usuario final. Además es posible caracterizar el servicio FTP con un número de indicadores limitados fuertemente correlacionados con la experiencia de usuario.

A continuación se definió para el servicio FTP un Indicador de Calidad de Servicio (SQI) como una composición de los más importantes KPIs de usuario en cada fase, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

	Activación PDP Context	Descarga de archivo	Desactivación PDP Context
Velocidad	Low	High	Low
Éxito	Medium	High	Low
Precisión	NA	Low	NA

Ilustración 38 Peso de los KPIs de importancia para FTP

Claramente para los servicios FTP, la fase más relevante es la de transferencia debido a que generalmente este servicio es usado para bajar archivos, imágenes, documentos, etc. y por consiguiente la velocidad afecta de una forma importante la percepción de usuario.

### 3.6.1.3 Definición KPI de Red

Como se dijo anteriormente, cada KPI de usuario depende de un conjunto de KPIs de Red. De hecho, cada KPI de usuario está relacionado a un único grupo de KPIs de Red, por ejemplo en el caso relevante a esta memoria mostrando el tiempo de demora en la bajada de datos, hay que relacionarlo con el throughput en las distintas interfaces de red.

#### 3.6.1.3.1 Indicadores de Red

La metodología para definir los indicadores de calidad de servicio (SQI) y los KPIs de usuarios requieren explicitar el uso de los KPIs de Red. Estos KPIs están mapeados directamente en los contadores de red en la tecnología Ericsson (tipo de tecnología usada por las redes que posee Entel PCS, P5.0.17) que describe el comportamiento de la red, creando un enlace con la experiencia del usuario.

Debido a la gran cantidad de KPIs existentes para mostrar la calidad de usuario se eligieron los siguientes KPIs de red para correlacionar el desempeño del servicio FTP desde una perspectiva de usuario con la situación en la que se encuentra la red y descrita por un pequeño número de indicadores. Principalmente en los servicios FTP con una importancia de mayor a menor los KPIs de usuarios son:

1. Éxito de la fase de activación del *PDP Context* (*PDP Context Activation Success Rate*).
2. Éxito de la fase de transferencia de datos (*Downloading Files Success Rate*).
3. Velocidad de la fase de transferencia de datos (*FTP Downloading Time*).

### 3.6.1.3.2 Éxito de la fase de activación del PDP Context.

La fase de activación de PDP *context* es la fase preliminar necesitada por el terminal para obtener una dirección IP. Para poder lograr esto, el terminal primero tiene que conectarse a la red, luego solicitar la dirección y obtener respuesta. Por lo tanto la fiabilidad de esta fase estará descrita por todos los indicadores que reportan el porcentaje de éxito y error de toda la fase y de los eventos relacionados a ella.

- **Tasa de éxito de conexión en el SGSN (*Attach on SGSN*).** Está basada en los contadores implementados en el *core network*.
- **Tasa de éxito en la activación de PDP *context* en el SGSN (*PDP Context Activation on SGSN*).** Está basada en los contadores implementados en el SGSN, relativo al manejo de sesión.
- **Accesibilidad de HSDPA en la celda (*HSDPA Accessibility*).** Depende de la configuración del Nodo. Se puede definir el número de usuarios que pueden ocupar HSDPA.

Tomando esto en cuenta se define:

$$EndUserKPI_{Dep\_PDP} = \left( \frac{AttachSuccessRateSGSN}{100} * \frac{PDPContextActSuccRateSGSN}{100} * \frac{HSDPAAccessibility}{100} \right) * 100$$

#### 3.6.1.3.2.1 Mediciones rendimiento de la red

Para el análisis del rendimiento se toma en cuenta el tráfico sobre la interfaz lu. La información fue recolectada en dos diferentes horarios (hora punta y hora valle). Se analizaron los protocolos de gestión de sesión y de movilidad. Dando los siguientes porcentajes que se muestran en las siguientes ilustraciones. En el caso de la accesibilidad a HSDPA se considera que es accesible el 98% de las veces, se obtuvo los datos del área de calidad de servicios. Ver apéndice D

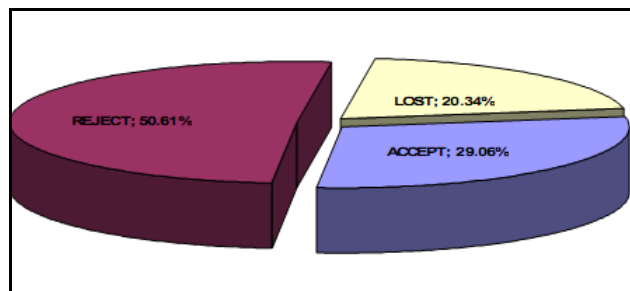


Ilustración 39 Tipos de respuesta a un mensaje de requerimiento de atachamiento

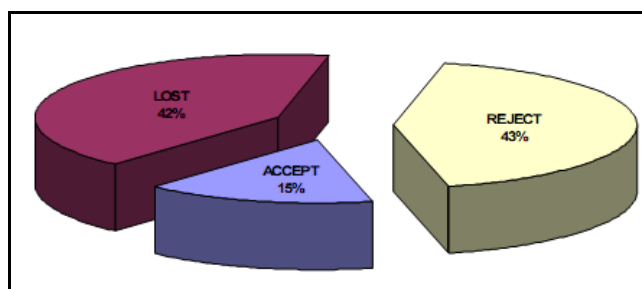


Ilustración 40 Respuestas a un requerimiento de activación de PDP

### 3.6.1.3.3 Éxito de la fase de transferencia de datos

Esta fase fue medida por la probabilidad que el servicio FTP, una vez obtenido, seguirá entregando el servicio bajo distintas condiciones por un periodo de tiempo dado. El principal KPI que se usó es la tasa de caída de HSDPA en la celda. Lo que define:

$$EndUserKPI_{Dep\_DataTransfr} = 100 - HSDPADropRateCell$$

### 3.6.1.3.4 Velocidad de la transferencia de datos

La velocidad de la transferencia de datos está principalmente influenciada por el tipo de RABs usados, la tasa de retransmisión, la congestión de la red, los parámetros de radio y la latencia. La latencia no puede ser medida por contadores de red, por esta razón el indicador principal que representa la velocidad de la transferencia de datos y que lleva implícita la latencia de la red es el *throughput* por usuario. Este *throughput* esperado por usuario será el obtenido por el modelo implementado.

$$EndUserKPI_{Speed\_DataTransfr} = \frac{HSDPThroughputPerUser}{HSDPThroughputPerUserTarget} * 100$$

### 3.6.1.4 Obtención SQI para FTP

Para obtener el SQI específico para FTP se ocupa el método explicado en 4.2.2 para valorar los KPI de usuario. El SQI se define a través de la suma de cada KPI de usuario clasificado dependiendo de la importancia. Los pesos usados en la fórmula se definieron como:

$$W_{low} = 0; W_{medium} = 0.5; W_{high} = 1 \text{ [28]}$$

Con esto se obtiene la fórmula de SQI, la cual se encuentra representada en el nodo final del modelo implementado:

$$SQI_{FTP} = \frac{W_{medium} * EndUserKPI_{DepPDP} + W_{high} * EndUserKPI_{Speed\_DataTransfer} + W_{high} * EndUserKPI_{Dep\_DataTransfer}}{W_{medium} + W_{high} + W_{high}}$$

Finalmente la calidad de servicio FTP está representada por la red Bayesiana que se ve en la ilustración 41 y que fue implementada en el software con las probabilidades correspondientes.

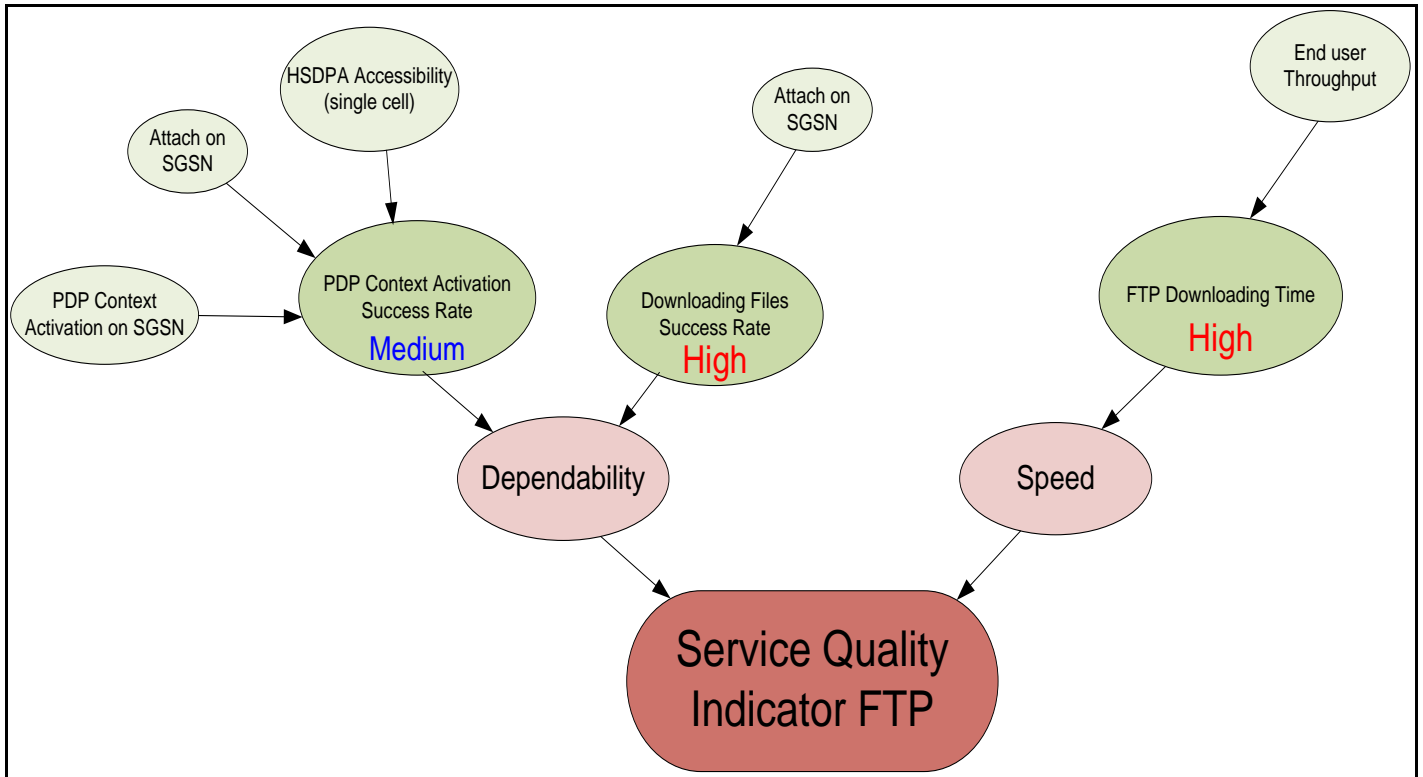


Ilustración 41 Red Bayesiana FTP SQI

En la ilustración 42 se muestra la implementación en el *software* del diagrama de la ilustración 41. Se muestran todas las variables que componen el modelo, con sus respectivos estados. Las barras representan las probabilidades que la variable se encuentre en ese estado (las probabilidades de los estados suman en total 100). En total este modelo está compuesto por 16 nodos, 15 enlaces y 388 probabilidades condicionales.

Para poder determinar si la calidad de servicio ofrecido para servicios FTP es excelente, aceptable o pobre se usa como referencia la ilustración 13. Lo que se ve reflejado en la variable *Service Quality Indicator FTP*, con los estados *Poor*, *Acceptable* y *Excellent*. Este nodo muestra la calidad del servicio FTP recibido por el usuario.

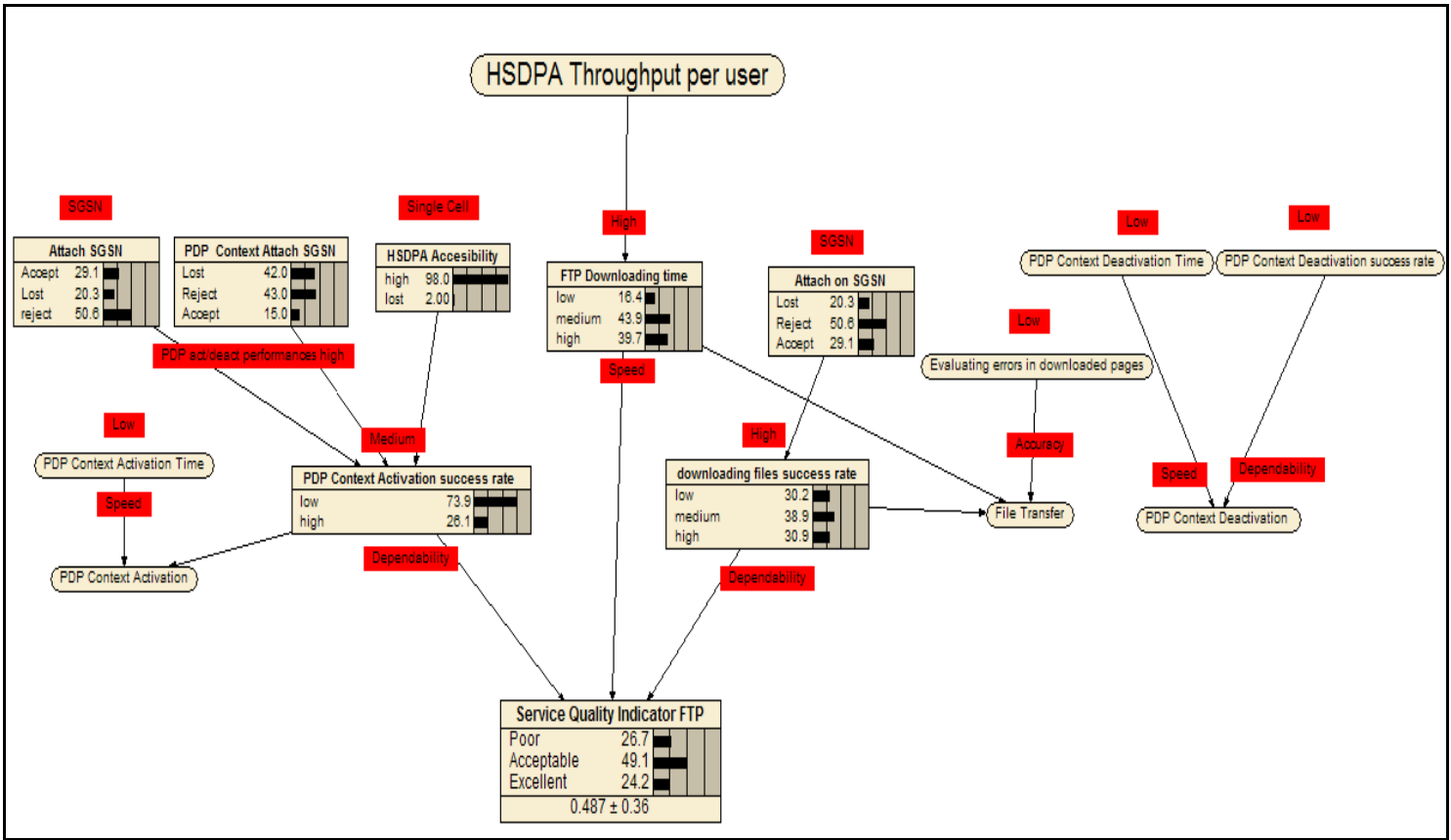


Ilustración 42 Modelo para predecir el Indicador de Calidad de Servicio FTP

# Capítulo 4

## Resultados, Análisis y Discusión

### 4.1 Modelamiento de estados de los elementos relevantes de Red

Después de definir los elementos principales que componen la red y que tienen mayor importancia en el *throughput* que recibe el usuario final y además que influyen en el servicio FTP, es necesario definir los estados que van a tener los nodos o variables aleatorias además de las probabilidades asociadas a los nodos y relaciones entre éstos.

La metodología utilizada para desarrollar toda la red bayesiana fue dividir el modelo en pequeñas redes bayesianas separadas con los elementos básicos que representan cada proceso. Gracias a las características que poseen todas las redes bayesianas es posible después “unir” estas pequeñas redes para formar una sola. También es posible ir aumentando la cantidad de nodos que componen cada red, aumentar la cantidad de estados de cada nodo y crear nuevas relaciones entre las variables. Con esto se puede aumentar el detalle del modelo y su complejidad para disminuir errores y así se asemeje más a la realidad.

Otra característica importante de las redes bayesianas que se ocupa es la forma de obtención de las probabilidades de cada estado de cada nodo. Para generar las estructuras de las redes bayesianas se pueden ocupar tres tipos de métodos:

1. Obtener la estructura y probabilidades de conocimientos de expertos (por ejemplo documentación entregada por el proveedor, información teórica de estudios externos, normas, etc.).
2. Obtener la estructura y probabilidades de datos obtenidos de mediciones (ya sean en terreno o laboratorios).
3. Mezclar los métodos 1 y 2.

Para la realización de este modelo se utilizó el método 3.



Los datos de mediciones fueron obtenidos por:

- La auditoria que realizó Telecom Italia a la red de Entel PCS en Agosto del 2008, en el proyecto “Audit E2E de la QoS de los Servicios de Datos 3G”. Estos datos se introdujeron en el modelo con el propósito de modelar comportamientos de la red observados en la realidad.
- Se realizaron pruebas en el laboratorio de Entel PCS, en la celda de prueba y se modificaron sus parámetros registrando su comportamiento frente a distintas situaciones. Además se realizaron mediciones en las oficinas de Entel PCS para poder obtener datos de un ambiente real.
- Se obtuvieron datos de las distintas normas y documentación entregada por el proveedor sobre los elementos que componen la red, además de la literatura correspondiente.

#### **4.1.1 Mediciones en Terreno**

La campaña de medición de los servicios de Entel PCS, fueron desarrollados a través de mediciones en terreno en algunas áreas de Santiago, que fueron elegidas en conjunto con Entel PCS y Telecom Italia (TI), para comprobar como el desempeño de la red UMTS/HSDPA es sensible a diferentes condiciones de radio y tráfico. Para este propósito fueron elegidas varias celdas significativas. Los siguientes párrafos contienen una descripción de la arquitectura de mediciones (en especial para el servicio FTP, el cual es relevante para esta memoria), y la metodología de pruebas seguida durante las mediciones.

Los objetivos de las mediciones en terreno son desarrollar, en un escenario real, un análisis en las funciones y desempeño de la red en términos de cobertura, calidad y desarrollo de servicios. Para examinar estos aspectos se definieron los siguientes elementos para cada una de ellas:

- Áreas de prueba en donde se realizarán las mediciones.
- Procedimientos de análisis de cobertura.
- Metodologías de recolección de datos por servicio (en este caso FTP).

##### **4.1.1.1 Definición de áreas de prueba**

Fueron realizadas mediciones estáticas tomando en cuenta la calidad de radio experimentada por el terminal en el punto donde la prueba fue realizada. Para esta memoria sólo es tomado en cuenta las mediciones estáticas debido a que no se realizará un estudio del comportamiento cuando el usuario está en movimiento (el terminal realiza *Handover* entre celdas, ver sección 2.3.2.3) debido al bajo porcentaje de usuarios que accede al servicio FTP en movimiento. Se utilizaron terminales con capacidades de tasas máximas en el downlink de 3.6 Mbps y en el uplink de 384Kbps.

Las áreas de medición fueron identificadas debido al conocimiento que se tiene sobre la topología de la red y usando un scanner de radio frecuencia para poder monitorear las condiciones de radio que el terminal experimenta.

Para las mediciones el terminal es localizado cerca de la antena y no recibe la potencia de otra celda comparable con la potencia de la celda analizada. El usuario está en una buena condición de cobertura y baja interferencia, por ende es esperable buenos rendimientos para el servicio en prueba.

#### 4.1.1.2 Análisis de cobertura

Se realizaron mediciones adicionales para verificar que las condiciones de radio de los sectores donde se deseaban realizar las pruebas coincidieran con las condiciones requeridas. Las mediciones fueron realizadas por un escáner de Radio Frecuencia (RF) y en particular los siguientes parámetros fueron considerados:

- **Indicador de intensidad de la señal recibida (RSSI):** es la potencia total recibida en el ancho de banda del canal de referencia (es decir 5 MHz full duplex).
- **Ec/No:** es el indicador de calidad para la señal recibida en el canal CPICH. Típicamente los escáners RF permiten medir el CPICH Ec/No para un cierto número de celdas recibidas.
- **RSCP (Potencia de la señal de código recibida):** específicamente para la mejor celda recibida, indica la cobertura ofrecida por la red.

Las mediciones RF fueron útiles para identificar las áreas donde existían *soft handover*, donde el móvil está conectado con más de una celda y áreas afectadas por polución en el canal piloto.

#### 4.1.1.3 Metodologías de recolección de datos para servicio FTP

La arquitectura usada durante las mediciones se puede ver el Apéndice B. Básicamente está compuesta por tres categorías de equipos:

- Para generación de tráfico, medición de rastreo y almacenamiento de datos.
- Para la recolección y elaboración de mediciones
- Terminales, con sus respectivos *simcards*.

## **4.1.2 Mediciones *throughput* final en Laboratorio**

Estas mediciones fueron tomadas en un Laboratorio 3G de Entel PCS destinado para realizar experimentos y probar equipos. En este laboratorio existe una celda de prueba que permite la modificación de algunos de sus parámetros, y como es un laboratorio se pueden obtener condiciones de radio óptimas.

Después de un análisis de las variables que afectan de mayor forma el *throughput* que va a recibir el usuario se vio que los factores más importantes (además de la potencia recibida por el terminal), es la interferencia de otros usuarios en la celda, afectando entre otras cosas el *scheduling* de los recursos. Los siguientes párrafos contienen una descripción de la arquitectura de las mediciones, la metodología de pruebas seguida y las mediciones.

Los objetivos de estas mediciones es desarrollar, en un escenario óptimo como el de un laboratorio, un análisis en las funciones y desempeño del *throughput* final, variando el número de usuarios en la celda.

### **4.1.2.1 Definición de área de prueba**

Fueron realizadas mediciones estáticas tomando en cuenta la calidad de radio experimentada por el terminal en la celda de prueba. Al igual que en la prueba de terreno se utilizaron terminales con capacidades de tasas máximas en el *downlink* de 3.6 Mbps y en el *uplink* de 384Kbps. La celda de medición fue identificada usando un scanner Ericsson llamada TEMS. Para las mediciones el terminal está cerca de la antena y no recibe ninguna otra celda, está en condiciones de cobertura óptima y baja interferencia.

### **4.1.2.2 Metodologías de recolección de datos para servicio FTP**

En este caso la arquitectura que fue usada durante las mediciones se puede ver en la ilustración 43. Para las pruebas se habilitó un servidor con archivos de distintos tamaños. Se trabajó con 4 terminales los cuales se conectarían al servidor y ocuparían los recursos de red.

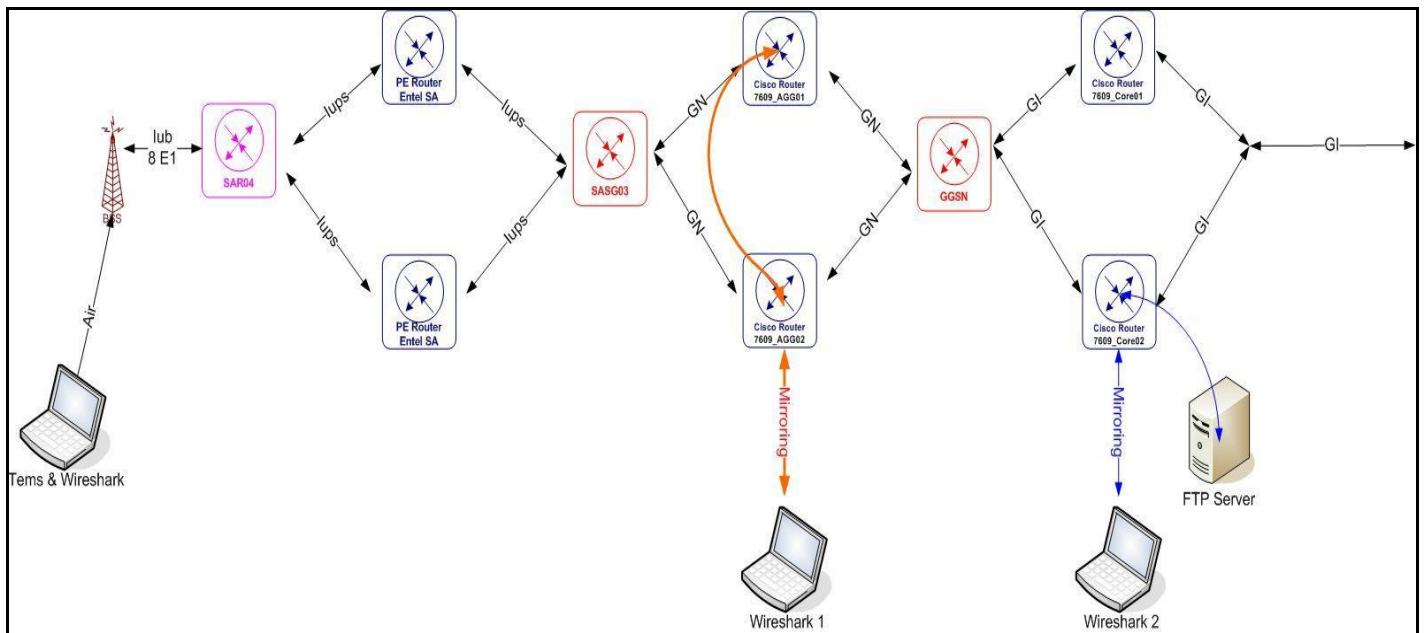


Ilustración 43 Arquitectura de prueba.

La metodología de pruebas se muestra en el diagrama de bloques de la ilustración 44. El usuario, al cual se medirá el *throughput*, establecerá la conexión con un servidor FTP (FTP server) indicado en la ilustración 43. Para ver la influencia de un *firewall* en el desempeño, se creará una conexión con y sin *firewall*.

Se descarga un archivo, midiéndose el tiempo de descarga y *throughput*. Para que las pruebas sean representativas se transfirió archivos de distintos tamaños (91MB, 28MB, 25MB, 10MB y 5MB), principalmente para ver el efecto de la capa de transporte. Se repitieron las descargas 10 veces por archivo, para calcular la media y la varianza.

En el inicio de la prueba solamente un usuario ocupará todos los recursos de la celda. Después se modificó en el Nodo B el parámetro *numberHSUser* (parámetro para determinar el número de usuarios que pueden ocupar HSDPA). Se hicieron pruebas variando el número de usuarios que ocupan HSDPA, compartiendo los recursos de radio de la celda, repitiendo los mismos procedimientos de medición. Se aumentó hasta cuatro usuarios en la celda, los cuales descargaban archivos desde el mismo servidor. Finalmente se midió como afectaba el *throughput* al usuario inicial. Otro parámetro vital que estaba configurado en el nodo es el tipo de scheduling, que en este caso es de *Round Robin*.

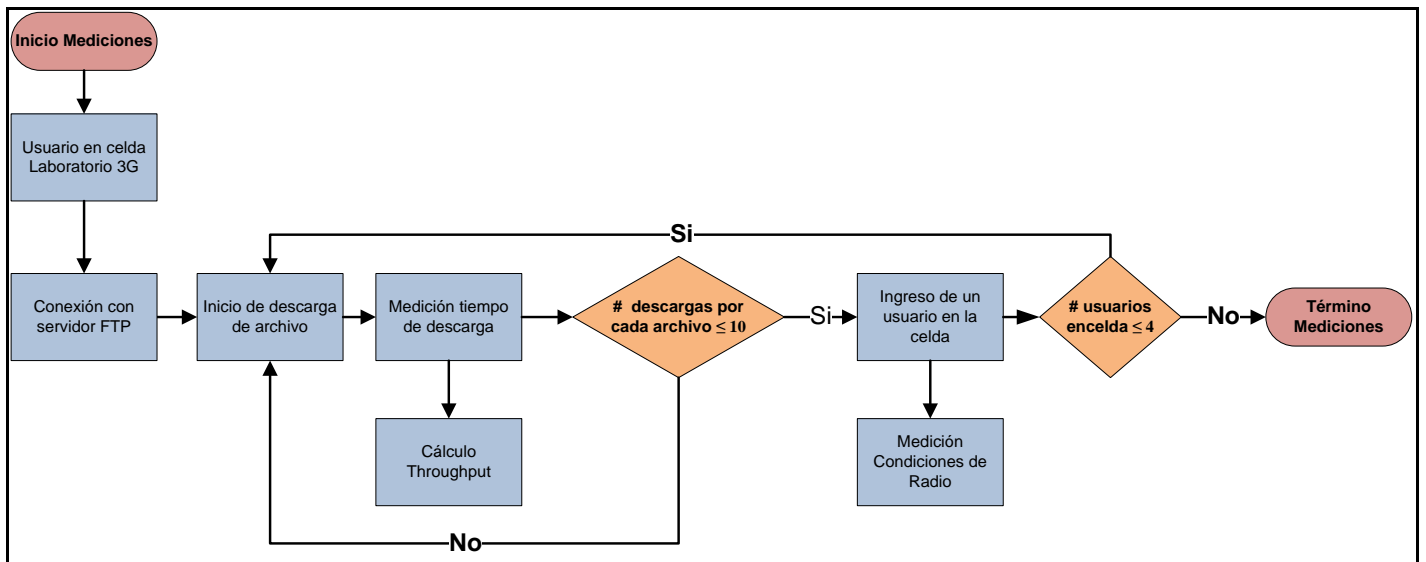


Ilustración 44 Diagrama de bloques de la metodología de las mediciones

#### 4.1.2.3 Resultado de las mediciones

El tiempo de descarga de un archivo es directamente proporcional al número de usuarios que se encuentran activos en la celda (ilustración 45). Por consiguiente el *throughput* recibido por el usuario es inversamente proporcional a la cantidad de usuarios compartiendo los recursos de red. En la ilustración 46 se muestra el comportamiento del *throughput* variando el número de usuarios y el tamaño del archivo.

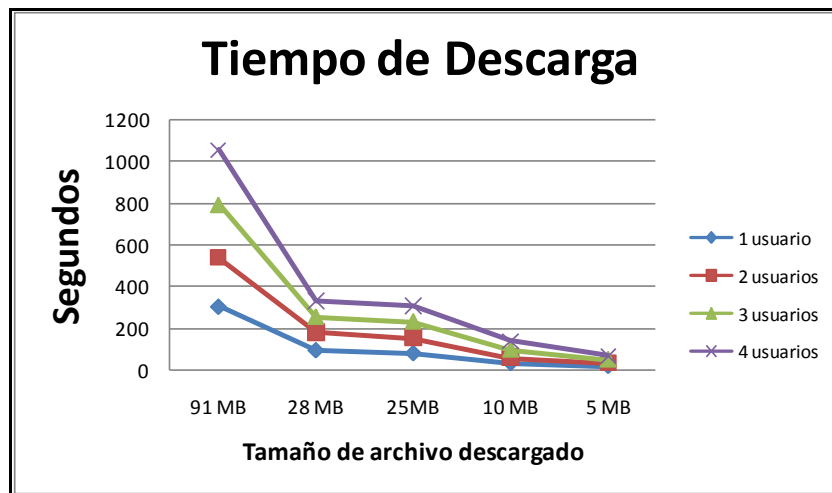


Ilustración 45 Tiempo de descarga con la variación de usuarios y tamaño del archivo

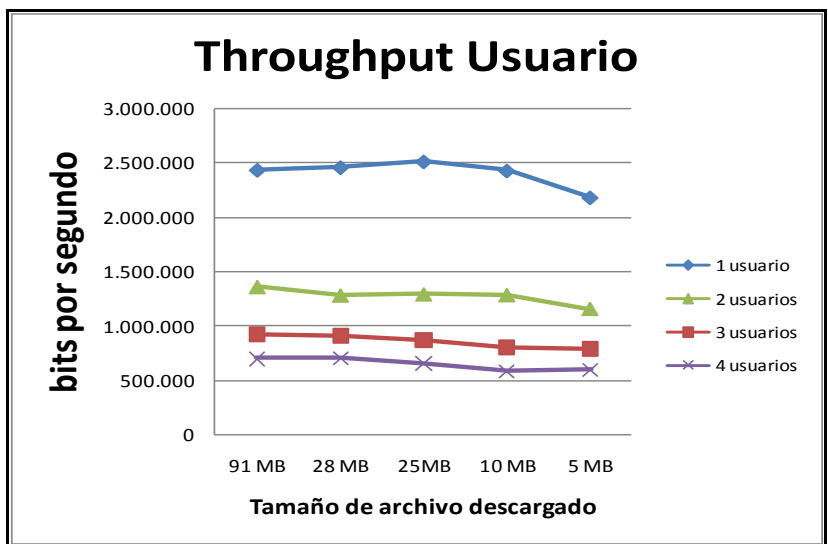


Ilustración 46 Throughput recibido por el usuario fina

Es importante señalar para entender los resultados, que el *scheduling* implementado en el Nodo es de *Round Robin*, influyendo en la repartición de recursos de red. Para el análisis de la influencia en la degradación del *peak* de *throughput* ofrecido por la capa de transporte y de aplicación, se tiene en cuenta de que el promedio de *throughput* de la capa MAC-hs por celda es de 2,472Mbps, el cual es medido en la RBS y está basado en la cantidad total de datos reconocidos que alcanzan los UEs en la celda y el número de sub-tramas en las cuales los datos han sido enviados. Así los efectos de la capa de aplicación y de transporte explicados en la sección 3.4.2.4 se reflejan en la ilustración 47.

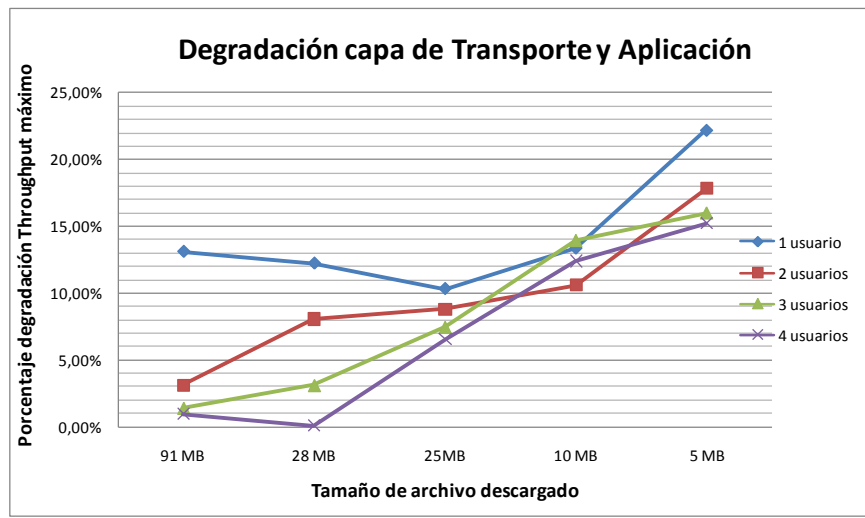


Ilustración 47 Porcentaje de Degradación del Throughput Máximo variando el numero de usuarios y el tamaño del archivo

Se ve que cuando el archivo descargado es de menor tamaño, los efectos de la latencia, las pérdidas de paquetes y los *delay spikes* (aumento repentino de la latencia) van a tener mayor influencia en el *throughput*, debido a que el porcentaje de estos sucesos en comparación con el tiempo de descarga total van a ser mayores que con archivos de mayor tamaño. Además, si se compara la degradación variando el número de usuarios se puede ver que mientras mayor sea el número de usuarios menor va a ser la degradación, esto ocurre principalmente debido al efecto del protocolo TCP disminuye el tiempo de sincronización. Con estas mediciones es posible aproximar los efectos de las capas de transporte y de aplicación para poder modelarlos en la red Bayesiana.

#### **4.1.3 Mediciones *throughput* final en condiciones normales**

Estas mediciones fueron tomadas en las oficinas que posee Entel PCS, en un área representativa. Debido a las características del sector las condiciones de radio no son óptimas y no se controla el número de usuarios que utilizarán los recursos de la celda. Se realizaron las pruebas estáticas en horario de máxima carga de la red y se ocupó la misma metodología de la ilustración 44.

Al igual que en las pruebas de laboratorio se estudió la interferencia de otros usuarios en la celda que también va a afectar el *scheduling*, que en este caso es de tipo *Proportional Fair*. Se realizó el mismo experimento que en la sección 3.6.2. Además para ver la influencia que tienen algunos elementos de red se habilitó un servidor FTP antes y después de un *firewall*. La arquitectura de las mediciones va a ser la de la ilustración 43.

##### **4.1.3.1 Resultado de las mediciones**

El tiempo de descarga de los archivos se pueden ver en las curvas de la ilustración 48, donde se ve la variación del tiempo tomando como variable el tamaño de archivo y el número de usuarios que se van agregando a la celda ocupando una mayor cantidad de recursos. A diferencia de las mediciones con el *scheduling Round Robin* existe una mínima diferencia en el tiempo de descarga variando los usuarios. En la ilustración 49 se muestra el *throughput* del usuario final.

Se puede ver que para archivos de mayor tamaño el *throughput* es inversamente proporcional a la cantidad de usuarios compartiendo recursos, en cambio cuando el archivo descargado es lo suficientemente pequeño los efectos de las capas superiores (transporte y de aplicación principalmente, ver en los efectos explicados en la sección 4.1.2.3) toman mayor importancia en la degradación del *throughput* final, siendo el comportamiento directamente proporcional.

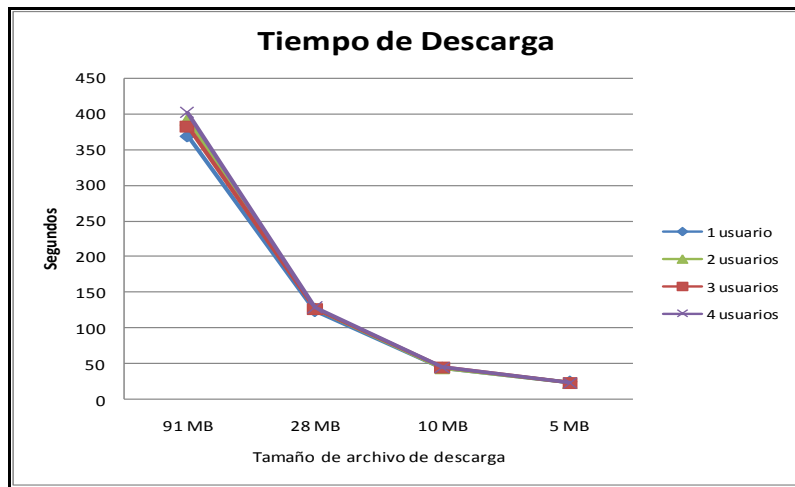


Ilustración 48 Tiempo de descarga variando el número de usuarios y el tamaño de archivo.

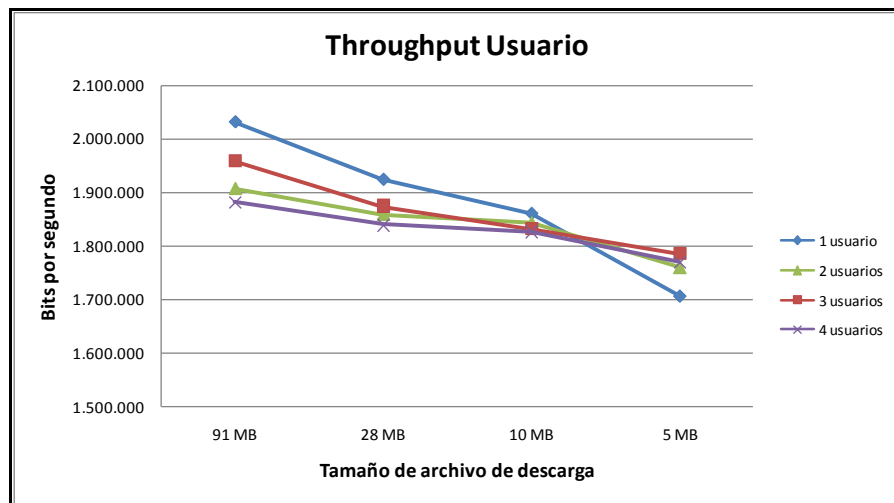


Ilustración 49 Throughput recibido por el usuario final.

En la ilustración 50 se puede ver la influencia de un elemento de red (en este caso la utilización de un *Firewall*) en el comportamiento del throughput del usuario final. Se puede ver que este elemento introduce un retardo en el tiempo final de descarga, traduciéndose en que el usuario recibe un menor *throughput*. También se puede ver que este retardo no es de importancia para archivos de gran tamaño. En el caso específico de las mediciones, el promedio del *throughput* al bajar archivos de 5 MBytes el *throughput* se ve afectado considerablemente (el *throughput* se degrada en un 6% aproximadamente). Estos efectos se modelan de acuerdo a lo establecido en la sección 3.4.2.4.



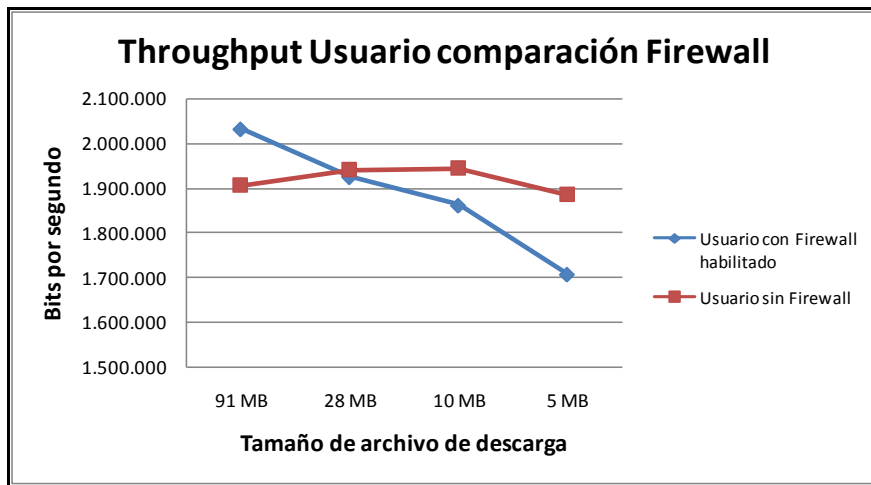


Ilustración 50 Efecto de degradación del throughput de un elemento de red.

#### 4.1.4 Mediciones *throughput* final variando la calidad de señal.

Para ver el comportamiento del *throughput* teniendo como variable la calidad de la señal se realizaron pruebas en condiciones distintas de ella. Para realizar esta prueba se utilizó la herramienta *TEMS* de Ericsson. Con esta herramienta es posible conectarse con una celda, sin que otra celda influya en el comportamiento del terminal.

Se seleccionaron tres escenarios dentro de una misma celda con distinta calidad de señal: buena, regular y mala. El parámetro que se eligió como discriminador es el  $E_c/N_0$  y los intervalos de calidad son los que se muestran en el Apéndice D.

Se usó el diagrama de bloques de la ilustración 44 para las mediciones, pero en este caso en particular no se realizaron pruebas variando el número de usuarios, ni variando el tamaño de los archivos. Se tomó en consideración que las pruebas se realizaron en horario de máxima carga, utilizando la arquitectura de red de la ilustración 43.

##### 4.1.4.1 Resultado de las mediciones

El efecto de la calidad del canal se ve reflejado en la curva de la ilustración 51, donde se muestra su fuerte dependencia en el *throughput* que recibe el usuario. Este efecto se modela según se muestra en la sección 3.4.2.3.

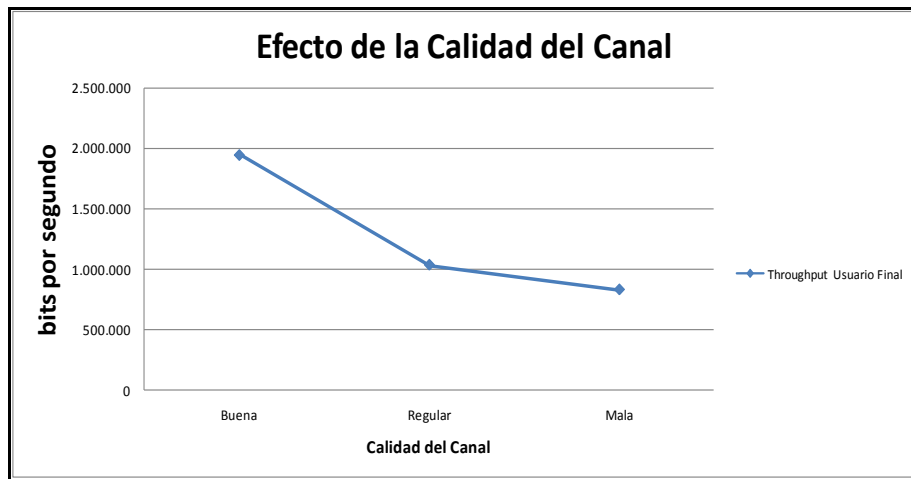


Ilustración 51 Throughput usuario final variando la calidad del canal

## 4.2 Resultado y Validación del Modelo

Después de realizar el estudio del Capítulo 3 se procedió a implementar el modelo en el software que simula Redes Bayesianas. Para la implementación se siguió el procedimiento explicado en la sección 3.3. Se definieron redes pequeñas, donde cada una representaba distintas partes del modelo. Finalmente se unieron estas redes según se muestra en la ilustración 35 donde se pueden ver los distintos elementos que la conforman y sus relaciones.

Las variables que conforman la red van a representar los elementos que tienen mayor relevancia en el *throughput* final, eventos ocurridos, así como los indicadores que representan las condiciones en que se encuentra el usuario, o como las condiciones del *core* y del acceso de radio.

En esta sección se comparan las mediciones de las pruebas en terreno con las mediciones obtenidas por el modelo. Además se hará un estudio sobre los resultados para poder validar el modelo.

### 4.2.1 Análisis de pruebas

El resultado más importante y evidente que genera el modelo, es el *throughput* esperado que va a recibir uno o más usuarios en la red HSDPA (3.5G).

#### 4.2.1.1 Comparación pruebas del laboratorio con el modelo

Las pruebas en el laboratorio se hicieron viendo el comportamiento de hasta 4 usuarios en la celda realizando descargas de archivos, según se explica en la sección 4.1.2.

Para comparar los resultados de las mediciones con los obtenidos con el modelo, se fijan las variables “*Scheduling*”, “*User Equipment Category*”, “*Radio Coverage*” y “*Channel*” del modelo en los estados “*Round Robin*”, “*Category 9*”, “*City*” y “*Good*” respectivamente. Con esto se modela un usuario ocupando un terminal de categoría 9, que se ve afectado por un *scheduling Round Robin* y que las condiciones ambientales no afectan en gran medida al *throughput* final. Con estas condiciones establecidas, las características de radio son óptimas, así la modulación y las tasas de codificación son las mejores probabilísticamente. Además para modelar el *throughput* obtenido por el usuario al compartir recursos, se modifica la variable “*HSDPA Users*” fijándola en los distintos estados posibles. Estos estados representan la cantidad de usuarios compartiendo recursos en la celda.

La comparación entre el modelo y las mediciones se puede ver en la ilustración 52. El *throughput* que se muestra en la curva “mediciones Round Robin” es la media de todas las mediciones realizadas variando el número de usuarios (se promedian todas las mediciones de los distintos tamaños de archivos). En la curva “modelo Round Robin” se muestra el resultado entregado por el nodo “*HSDPA Throughput per user*” que muestra la media del *throughput* esperado que el usuario final recibe al ingresar a la red HSDPA, más la desviación estándar que tiene este valor. El *throughput* que entrega este nodo está en kbits por segundo.

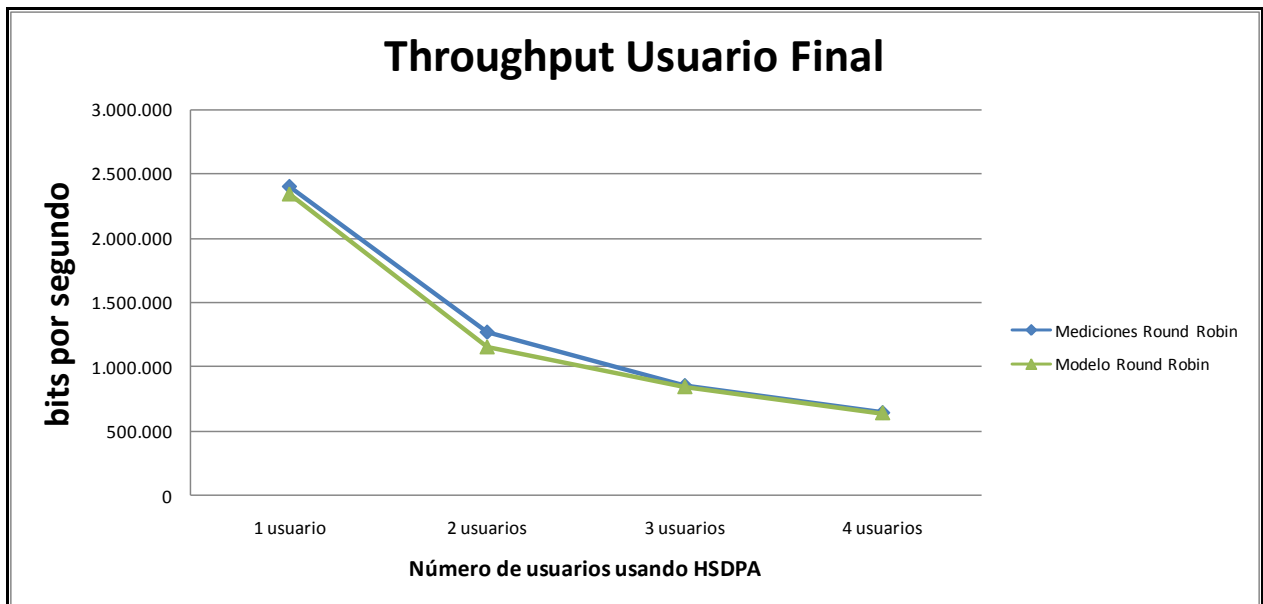


Ilustración 52 Comparación pruebas en el laboratorio con modelo implementado

#### 4.2.1.2 Comparación pruebas en un entorno normal

Las pruebas en una celda tipo se hicieron viendo el comportamiento de hasta 4 usuarios en la celda realizando descargas de archivos, según se explica en la sección 4.1.3.

Para comparar los resultados de las mediciones con los obtenidos con el modelo, se fijan las variables “*Scheduling*”, “*User Equipment Category*” y “*Radio Coverage*” del modelo en los estados “*Proportional Fair*”, “*Category 9*” y “*City*” respectivamente. Con esto se modela un usuario ocupando un terminal de categoría 9, que se ve afectado por un *scheduling Proportional Fair* y que se encuentra en condiciones ambientales comunes tipo. Con estas condiciones establecidas, las características de radio no son óptimas, este escenario se ve reflejado en las probabilidades de los estados en que se encuentran las variables representativas que presenta la red y el terminal. Además para modelar el *throughput* obtenido por el usuario al compartir recursos, se modifica la variable “*HSDPA Users*” fijándola en los distintos estados posibles. Estos estados representan la cantidad de usuarios compartiendo recursos en la celda.

La comparación entre el modelo y las mediciones se puede ver en la ilustración 54. El *throughput* que se muestra en la curva “mediciones Proportional Fair” es la media de todas las mediciones realizadas variando el número de usuarios (se promedian todas las mediciones de los distintos tamaños de archivos). En la curva “modelo Proportional Fair” se muestra el resultado entregado por el nodo “*HSDPA Throughput per user*” que muestra la media del *throughput* esperado que el usuario final recibe al ingresar a la red HSDPA, mas la desviación estándar que tiene este valor. El *throughput* que entrega este nodo está en kbits por segundo.

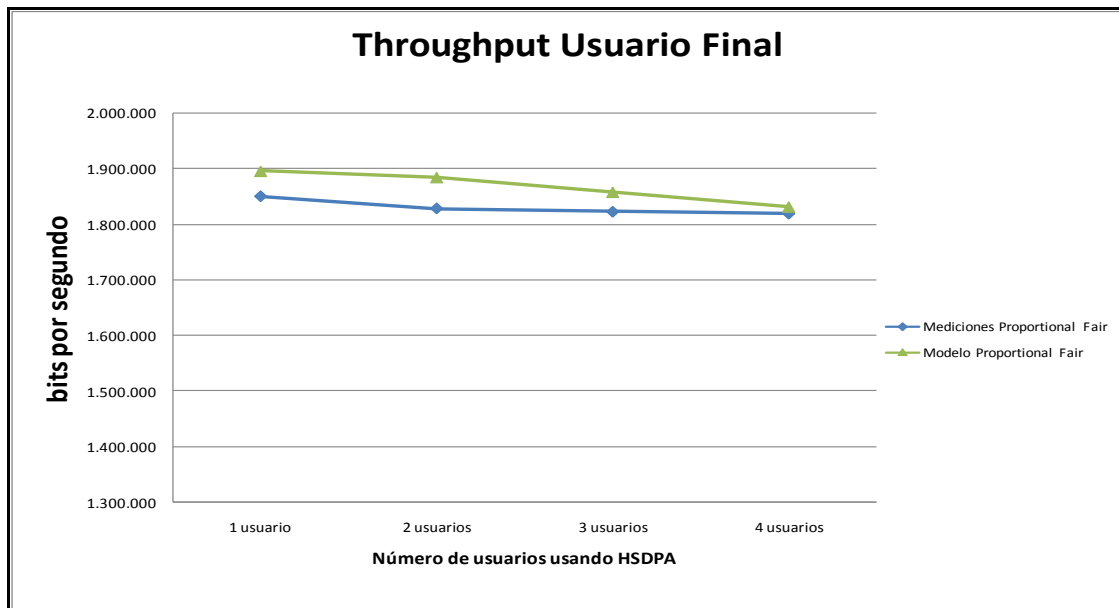


Ilustración 53 Comparación modelo con mediciones en una celda tipo

#### 4.2.1.3 Comparación pruebas variando la calidad del canal

Las pruebas variando la calidad del canal se hicieron viendo el comportamiento del *throughput* recibido por el usuario en distintas condiciones de canal, según se explica en la sección 4.1.4.

Para comparar los resultados de las mediciones con los obtenidos con el modelo, se fijan las variables “*Scheduling*”, “*User Equipment Category*”, “*HSDPA users*” y “*Radio Coverage*” del modelo en los estados “*Proportional Fair*”, “*Category 9*”, “*n 1 user*” y “*City*” respectivamente. Con esto se modela un usuario ocupando un terminal de categoría 9, que se ve afectado por un *scheduling Proportional Fair* y que se encuentra en condiciones de core normales. Con estas condiciones establecidas, para las mediciones obtenidas por el modelo se modifica la variable “*Channel*”, fijándola en los distintos estados posibles. Estos estados representan la calidad del canal en el momento de descarga.

La comparación entre el modelo y las mediciones se puede ver en la ilustración 54. El *throughput* que se muestra en la curva “mediciones Pruebas” es la media de todas las mediciones realizadas variando la calidad del canal (en este caso sólo se realizaron descargas con un archivo de tamaño de 10 MBytes). En la curva “Throughput Modelo” se muestra el resultado entregado por el nodo “*HSDPA Throughput per user*” que muestra la media del *throughput* esperado que el usuario final recibe al ingresar a la red HSDPA, más la desviación estándar que tiene este valor. El *throughput* que entrega este nodo está en kbits por segundo.

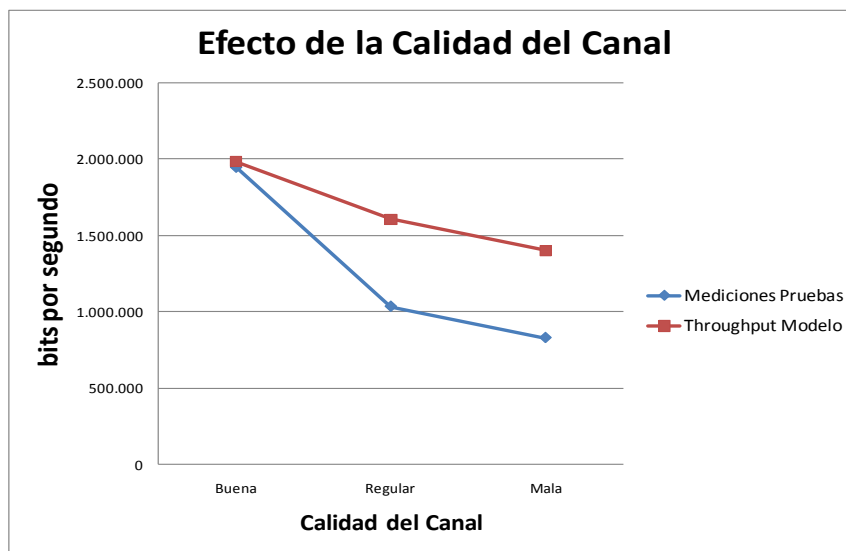


Ilustración 54 Comparación modelo con mediciones variando la calidad del canal

#### 4.2.2. Validación Modelo

Para la validación del modelo se realizó un test de hipótesis (o contraste de hipótesis). Este test es un procedimiento estadístico mediante el cual se investiga la verdad o falsedad de una hipótesis. Se llama hipótesis nula (se representa como  $H_0$ ), a la hipótesis que se formula y por lo tanto se quiere contrastar o rechazar; e hipótesis alternativa (se representa por  $H_1$ ), a cualquier otra hipótesis que sea diferente de la formulada, y que sea contraria a  $H_0$ , de forma que la aceptación de la hipótesis nula  $H_0$  implica el rechazo de la alternativa  $H_1$  y viceversa, el rechazo de  $H_0$  implica la aceptación de  $H_1$ .

En el caso de esta memoria se plantea que la hipótesis nula  $H_0$  es que la media  $\mu'$  del modelo es representativa de la media  $\mu$  de las mediciones. En otras palabras:

$$H_0: \mu = \mu'; H_1: \mu \neq \mu'$$

Hay ocasiones en que  $H_0$  es cierta, pero a la vista de la muestra se tiene que rechazar, en tal caso se comete un error. El error que consiste en rechazar la hipótesis nula cuando ésta es verdadera, se denomina error de tipo I. Otro tipo de error puede ocurrir cuando, siendo  $H_0$  falsa, las evidencias de la muestra llevan a aceptar esta falsa hipótesis. Este error se denomina error de tipo II. Esto se resume en la siguiente tabla.

		Situación	
		$H_0$ Verdadera	$H_1$ Verdadera
Decisión	Mantener $H_0$	<b>Decisión correcta</b> Probabilidad= $1-\alpha$	<b>Decisión incorrecta</b> ERROR DE TIPO II Probabilidad= $\beta$
	Rechazar $H_0$	<b>Decisión incorrecta</b> ERROR DE TIPO I Probabilidad= $\alpha$	<b>Decisión correcta</b> Probabilidad= $1-\beta$

Tabla 13 Tipos de errores en los test de hipótesis

Donde  $\alpha$  es el nivel de significación y  $(1-\alpha)$  es el nivel de confianza.

Al tener formulada la hipótesis nula, es necesario que las evidencias sean muy fuertes para rechazarla. Por lo tanto lo que se hace es fijar un cierto intervalo dentro del cuál es normal que haya cambios, es decir, una región tal que si el parámetro se mantiene en dicho intervalo, nos seguimos quedando con  $H_0$ , pues esas pequeñas variaciones son debidas al azar. Ese intervalo o región se denomina región de aceptación, y será mayor o menor dependiendo del nivel de confianza que se precise  $(1-\alpha)$ . La región que quede fuera de la región de aceptación indica que en este caso los cambios no se pueden atribuir al azar, y por tanto se rechaza  $H_0$  y se acepta  $H_1$ . Tal región se llama región crítica o de rechazo.

Para analizar el modelo se utiliza el **valor P**. El **valor P** asociado a un resultado observado, es la probabilidad de obtener un valor como el observado o más extremo si la hipótesis nula ( $H_0$ ) es cierta. Se rechaza la hipótesis nula si el valor P asociado al resultado observado es igual o menor que el nivel de significación establecido, en este caso se establece un nivel de significación de  $\alpha = 0,05$  (generalmente se recomienda ocupar este valor). El **valor P** es un valor de probabilidad por lo que oscila entre 0 y 1. Así, podemos decir que valores altos de valor P aceptan la  $H_0$  o, dicho de forma correcta, no permiten rechazar la  $H_0$ . De igual manera, valores bajos de valor P rechazan la  $H_0$ .

Para obtener el **valor P** se utiliza la prueba T de *Student* para la muestra de las mediciones y la muestra resultante del modelo. Esta prueba devuelve la probabilidad de que dos muestras puedan proceder de dos poblaciones subyacentes con igual media. Se especifica que la distribución posee dos colas y que las varianzas de las dos muestras son diferentes. A continuación se muestran los resultados del test de hipótesis.

#### 4.2.2.1. Resultados Test de Hipótesis

Lo importante del modelo es poder predecir el *throughput* del usuario final. Por esta razón se comparan las medias mediante el test de hipótesis. Principalmente se hace un estudio para tres casos, mostrando los resultados correspondientes. El primero es con un *scheduling Round Robin*, el segundo con un *scheduling Proportional Fair* y finalmente se hace un estudio frente a la variación de la calidad del canal.

##### 4.2.2.1.1. Comparación Round Robin

Como se dijo anteriormente no basta con sólo comparar las medias para poder validar las medias. Hay que comprobar el nivel de significación y así validar H0.

Los principales resultados se ven en la tabla 14 y 15.

<b>Round Robin</b>			
<b>1 usuario</b>		<b>2 usuarios</b>	
Modelo		Modelo	
Media [kbps]	2.272.000	Media [kbps]	1.157.921
Desviación estándar [kbps]	338.171	Desviación estándar [kbps]	267.557
valor p	0,24	valor p	0,09
Error de medias	2,46%	Error de medias	5,21%
Mediciones		Mediciones	
Media [kbps]	2.329.405	Media [kbps]	1.221.508
Desviación estándar [kbps]	138.477	Desviación estándar [kbps]	111.333

Tabla 14 Validación Round Robin para 1 y 2 usuarios

3 usuarios		4 usuarios	
Modelo		Modelo	
Media [kbps]	843.878	Media [kbps]	644.554
Desviación estándar [kbps]	129.086	Desviación estándar [kbps]	127.063
valor p	0,98	valor p	0,68
Error de medias	0,07%	Error de medias	1,03%
Mediciones		Mediciones	
Media [kbps]	843.306	Media [kbps]	638.006
Desviación estándar [kbps]	65.609	Desviación estándar [kbps]	48.425

Tabla 15 Validación para Round Robin para 3 y 4 usuarios

Con estas dos tablas se puede decir que el modelo en este caso particular predice correctamente el *throughput* del usuario final. Esto ocurre debido a que el **Valor P** de 1 a 4 usuarios es mayor que el nivel de significancia, el cual se decidió de  $\alpha=0,05$ . Además se puede ver que la diferencia máxima entre las medias es baja, de 5,21%.

Por lo tanto cuando el *scheduling* de *Round Robin* se valida la hipótesis  $H_0$  para cada caso (1, 2, 3 y 4 usuarios compartiendo los recursos).

#### 4.2.2.1.2. Comparación Proportional Fair

Para el caso de condiciones normales en las tablas 16 y 17 se muestran los valores más importantes.

Proportional Fair			
1 usuario		2 usuarios	
Modelo		Modelo	
Media [kbps]	1.896.429	Media [kbps]	1.885.204
Desviación estándar [kbps]	377.201	Desviación estándar [kbps]	387.113
valor p	0,374	valor p	0,27
Error de medias	2,49%	Error de medias	3,09%
Mediciones		Mediciones	
Media [kbps]	1.850.280	Media [kbps]	1.828.776
Desviación estándar [kbps]	155.255	Desviación estándar [kbps]	145.301

Tabla 16 Validación para Proportional Fair para 1 y 2 usuarios



3 usuarios		4 usuarios	
Modelo		Modelo	
Media [kbps]	1.858.673	Media [kbps]	1.832.143
Desviación estándar [kbps]	401.930	Desviación estándar [kbps]	406.471
valor p	0,52	valor p	0,77
Error de medias	1,96%	Error de medias	0,69%
Mediciones		Mediciones	
Media [kbps]	1.822.879	Media [kbps]	1.819.562
Desviación estándar [kbps]	151.631	Desviación estándar [kbps]	71.468

Tabla 17 Validación para 3 y 4 usuarios

Con estas dos tablas se puede decir que el modelo en este caso particular predice correctamente el *throughput* del usuario final. Esto ocurre debido a que el **Valor P** de 1 a 4 usuarios es mayor que el nivel de significancia en cada caso, el cual se decidió de  $\alpha=0,05$ . Además se puede ver que la diferencia máxima entre las medias es baja, de 3,09%.

#### 4.2.2.1.3. Comparación Calidad de señal

Los principales valores de las mediciones y de los obtenidos por el modelo variando la calidad de la señal se muestran en la tabla 18.

Calidad de la Señal					
Buena		Regular		Mala	
Modelo		Modelo		Modelo	
Media [kbps]	1.981.818	Media [kbps]	1.606.250	Media [kbps]	1.401.546
Desviación estándar [kbps]	287.978	Desviación estándar [kbps]	417.212	Desviación estándar [kbps]	345.767
valor p	0,30	valor p	0,00001	valor p	0,0000003
Error de medias	1,78%	Error de medias	55,37%	Error de medias	69,21%
Mediciones		Mediciones		Mediciones	
Media [kbps]	1.947.253	Media [kbps]	1.033.824	Media [kbps]	828.311
Desviación estándar [kbps]	37.988	Desviación estándar [kbps]	174.153	Desviación estándar [kbps]	131.686

Tabla 18 Validación para diferentes calidades del canal

En el caso de que se tiene una buena señal se acepta  $H_0$  debido a que el valor P obtenido es de 0,3, lo cual es mayor al nivel de significancia 0,05.

En cambio para una calidad regular y mala se puede ver un valor P bajo, mucho menor al nivel de significancia (lo que se ve en los elevados porcentajes de error en las medias del modelo y de la medición), por consiguiente se rechaza  $H_0$ . Esto significa que el modelo no predice correctamente el *throughput* del usuario final si no se encuentra en buenas condiciones del canal (en este caso se decide que una condición buena es la que generalmente se encuentra en una celda tipo).

No se pudo ajustar mejor el modelo para que los resultados se parezcan más a la realidad, debido principalmente a la falta de información del comportamiento de variables importantes como la codificación, la tasa o la cantidad de códigos utilizados cuando se variaba la calidad del canal.

En este caso se decide dejar el modelo con estas características, ya que no son relevantes de gran manera en el objetivo principal de la memoria, el cual es predecir el throughput que recibe un usuario al ocupar la red HSDPA. Además según las estadísticas las probabilidades de tener una calidad de señal regular o mala en un ambiente urbano son bajas. Queda como trabajo futuro poder modelar mejor estas características.

# Capítulo 5

## Conclusiones

La incorporación de la tecnología HSDPA (3.5G) a UMTS (3G), permite al Operador un mejor desempeño de su red para entregar una mejor Calidad de Servicio (QoS) al usuario final. Con este sistema se mejora potencialmente la velocidad de servicio entregado. En particular, se aumenta considerablemente la velocidad de subida y bajada de datos, se reducen las pérdidas en la transferencia, se mejora el acceso web, se mejora los servicios de Voz sobre IP (VoIP) y servicios de *streaming*, entre otros. Sin embargo el operador necesita de indicadores objetivos para conocer el QoS.

En este trabajo se ha propuesto un modelo probabilístico basado en Redes Bayesianas para aplicarlo en un sistema HSDPA. La característica probabilística se debe a la incertidumbre que presentan las variables que conforman una red de datos móviles. Los comportamientos de estas variables no se conocen con exactitud, pero se dispone de datos estadísticos y mediciones de ellas. Para la implementación del modelo se utiliza el software especializado en la creación de Redes Bayesianas, “*Netica*” de *Norsys Software Corp.*, que permite trabajar con redes probabilísticas y diagramas de influencia.

Este trabajo es el primer intento en modelar un **sistema completo** de HSDPA, esto es su comportamiento en ambiente *indoor* y *outdoor* con el propósito de predecir su comportamiento en un ambiente real.

El modelo propuesto estima a través del parámetro **throughput** el QoS percibido por el usuario. El *throughput* es la velocidad efectiva que el usuario es capaz de recibir y enviar datos desde y hacia la red. Con este parámetro es posible calcular el Indicador de Calidad de Servicio (SQI) para FTP, permitiendo al operador saber *a priori* el desempeño de su red.

En el desarrollo del modelo se caracterizó:

- La degradación del throughput por la influencia que ejercen las diferentes capas del protocolo de comunicación. Se toma en cuenta también la arquitectura y protocolos de la red inalámbrica y se utiliza el método de degradación para obtener los factores que caracterizan al usuario final.
- Se definió un método de análisis (método de degradación) para poder obtener los valores de los factores que afectan y caracterizan al usuario

final. Una particularidad de este sistema de degradación es ser un método aplicable a cualquier tecnología, permitiendo ser la base para modelar cualquier otro sistema que sea semejante.

Para la validación del modelo se utilizaron datos facilitados por la empresa ENTEL PCS y obtenidos por el Área de Calidad de la empresa. Se realizaron además mediciones utilizando la tecnología HSDPA, tanto en condiciones ideales como en terreno.

El modelo fue aplicado a un escenario real correspondiente a una zona de la ciudad de Santiago definida por el operador y sus resultados fueron comparados mediante un test de hipótesis con mediciones de red. El indicador de QoS modelado para el caso de transferencia de archivos difiere del obtenido con las mediciones en un **5%**, demostrando que el diseño realizado es satisfactorio para las necesidades del operador cumpliendo con los requerimientos de predecir el *throughput* de un usuario en una red HSDPA.

El principal aporte del modelo es mostrar los elementos, relaciones y dependencias más importantes de las variables que participan de los procesos de servicio de transferencia de archivos por la red, lo que permiten predecir el nivel de QoS hacia el usuario.

Se concluye que el modelo refleja que las variables más importantes en la predicción del *throughput* objetivo, es la variable “cantidad de usuarios” utilizando servicios del mismo tipo y las variables de “recursos de radio” asignados en la celda.

Finalmente el Área de Planificación o el Área de Calidad de Servicio de Entel PCS dispondrán con este modelo de una herramienta que permite predecir el comportamiento de la Red y conocer las variables necesarias de gestionar, para asignar los recursos en forma óptima.

Tras cumplir los objetivos trazados, se sugieren realizar las siguientes investigaciones y mejoras futuras:

- Implementar un sistema de diagnóstico de fallas de la red, dado que las características del modelo desarrollado en este trabajo muestra las variables más importantes de la red.
- Modificación de las probabilidades, ajustándolas aún más a la realidad.
- Analizar efectos en cargas críticas, analizar efectos modificándolos parámetros principales.

- Aplicarlo a otras tecnologías posteriores como HSUPA o LTE.
- Incorporar un elemento vital para las comunicaciones móviles que es el Handover.
- Modelar distintos tipos de servicios.

# Referencias

- [1] **A. B. García, M. Álvarez-Campana, E. Vázquez, J. Berrocal.** “*Diseño de redes de acceso en sistemas móviles UMTS con soporte de calidad de servicio*”. Depto. Ingeniería de Sistemas Telemáticos, Universidad Politécnica de Madrid 2002.
- [2] **Copyright Rysavy Research and 3G Americas** “*Edge, HSPA and LTE the mobile broadband advantage*” Septiembre 2007.
- [3] **Harri Holma y Antti Toskala** “*HSDPA/ HSUPA for UMTS, High Speed Radio Access for Mobile Communications*” editorial WILEY 2006
- [4] **3GPP.** “*End-to-end Quality of Service (QoS) concept and architecture*”. 3GPP TS 23.207 version 7.0.0 Release 7.
- [5] **Jesús Nicómedes Leal León,** “*Modelo del Núcleo de red IP de una red 3G para transporte de Multimedia en tiempo real*” Noviembre 2006 Tijuana México, Instituto Politécnico Nacional, centro de investigación y desarrollo de tecnología digital.
- [6] **3GPP.** “*Quality of Service (QoS) concept and architecture*”. 3GPP TS 23.207.
- [7] **Johan Sköld, Magnus Lundevall, Stefan Parkvall and Magnus Sundelin** “*Broadband data performance of third-generation mobile systems*” 2005
- [8] **Azael Fernández A.** “*IPv6. Herramienta crucial de la innovación*”. Publicado en: Boletín Info@CITEL, agosto 2006
- [9] **Sergio Ramírez, María Cervantes,** “*Introducción al IPv6*” Noviembre 2005 Ubicación: <http://www.rau.edu.uy/ipv6/queesipv6.htm>.
- [10] **Ericsson** “*Basic concepts of HSPA*” February 2007
- [11] **G. A. Ramos, Student Member, IEEE, A. Torres, Senior Member, IEEE y J-P. Rognon, Member, IEEE.** “*Análisis de Confiabilidad de Sistemas Industriales Aplicando Redes Bayesianas Considerando Aspectos de PQ y Seguridad - Caso de Estudio Sistema IEEE 493*” Diciembre 2007.
- [12] <http://www.norsys.com/index.html>, Norsys software corp.

- [13] **K. Wojtek Przytula, HRL Laboratories, Don Thompson, Pepperdine University, Department of Mathematics, IEEE 2000.** “*Construction of Bayesian Networks for Diagnostics*”
- [14] **Rana Khanafer, Lars Moltsen, Hervé Dubreil, Zwi Altman and Raquel Barco** “A Bayesian Approach for automated troubleshooting for UMTS networks”, **IEEE 2006.**
- [15] **G. Gómez y R. Sánchez.** “*End-to-End Quality of Service over Cellular Networks Data Services Performance and Optimization in 2G/3G*”. **2005 editorial John Wiley & Sons Ltd.**
- [16] **Ericsson** “*Understanding KPIs*”, 2005
- [17] <<http://tools.ietf.org/html/rfc959>>, File Transfer Protocol
- [18] **Jaime Espinoza Armijo.** “*Dimensionamiento de la Capacidad y Caracterización de la calidad de una red GPRS*”, Tesis (Ingeniero Civil Electricista) Universidad de Chile, 2007.
- [19] **Timo Halonen, Javier Romero, Juan Melero.** “*GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution Towards 3G/UMTS*” 2003.
- [20] <<http://dewey.uab.es/pmarques/edusoft.htm>>
- [21] **Pablo José Ameigeiras Gutierrez.** “*Packet Scheduling and Quality of Service in HSDPA*”, Ph. D. Tesis Octubre 2003.
- [22] **Ericsson,** “*WCDMA Air Interface*”, L2T 123 7279 R5B 2006.
- [23] **N2NSoft white paper series,** “*Simulating High Speed Downlink Packet Access*”, N2NSOFT Copyright 2006.
- [24] **Frank Brouwer, Irene de Bruin, Joao Carlos Silva, Nuno Souto, Francisco Cercas, Américo Correia,** “*Usage of Link-Level Performance Indicators for HSDPA Network-Level Simulations in E-UMTS*”, ISSSTA2004, Sydney, Australia, 2004.
- [25] **Ericsson,** “*TEMS™ Pocket 6.1 for Nokia N95, User’s Manual*”, 2008.
- [26] **María Elsa Feliz Fernández,** “*HSDPA CQI Mapping Optimization Based on Real Network Layouts*” Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering, October 2008

[27] <http://sauce.pntic.mec.es/~jpeo0002/Archivos/PDF/T05.pdf>

[28] **Telecom Italia**, “*Entel PS41EPCS - Audit E2E de la QoS de los Servicios de Datos 3G*”, 2008, *confidencial*.



# Apéndice A

## Lista de Acrónimos

<b>A</b>	
AAL	<i>ATM Adaptation Layer</i>
ACK	<i>ACKnowledgement</i>
AMPS	<i>American Mobile Phone System</i>
ARIB	<i>Association of Radio Industries and Business in Japan</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
AuC	<i>Autentification Center</i>
<b>B</b>	
BLER	<i>Block Erasure Rate</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BS	<i>Base Station</i>
BSC	<i>Base Station Controller</i>
BSS	<i>Base Station System</i>
<b>C</b>	
C/I	<i>Carrier to Interference</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CN	<i>Core Network</i>
CPICH	<i>Common Pilot Channel</i>
CQI	<i>Channel Quality Information</i>
CS	<i>Circuit Switching</i>
<b>D</b>	
DCH	<i>Dedicated Channel</i>
DL	<i>DownLink</i>
<b>E</b>	
$E_c/N_o$	<i>Chip Energy over noise</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rate for GSM Evolution</i>
E-GPRS	<i>GPRS over EDGE</i>
EIR	<i>Equipment Identity Register</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standars Institute</i>
<b>F</b>	
FEC	<i>Frame Error Correction</i>
FER	<i>Frame Error Rate</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
<b>G</b>	
GGSN	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
GMSC	<i>Gateway Mobile Services Switching Center</i>
GMSK	<i>Gaussean Minimum Shift Keying</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communication</i>
<b>H</b>	
HDLC	<i>High Level Data Link Control</i>
HS-DPCCH	<i>High-Speed Dedicated Physical Control CHannel</i>
HS-DSCH	<i>High-Speed Downlink Shared CHannel</i>
HS-PDSCH	<i>High-Speed Physical Downlink Shared CHannel</i>

<i>HS-SCCH</i>	<i>High-Speed Shared Control CHannel</i>
<i>HSDPA</i>	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
<i>HSPA</i>	<i>High Speed Packet Access</i>
<i>HSUPA</i>	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>
<i>HLR</i>	<i>Home Local Register</i>
<i>HTTP</i>	<i>HyperText Transport Protocol</i>
<i>HW</i>	<i>Hardware</i>
<b>I</b>	
<i>IMEI</i>	<i>International Mobile Equipment Identity</i>
<i>IMSI</i>	<i>International Mobile Subscriber Identity</i>
<i>IMT</i>	<i>International Mobile Telephony</i>
<i>IP</i>	<i>Internet Protocol</i>
<i>ISDN</i>	<i>Integrated Services Digital Network</i>
<i>ISP</i>	<i>Internet Service Provider</i>
<i>ITU</i>	<i>International Telecommunication Union</i>
<b>L</b>	
<i>L2</i>	<i>Layer 2</i>
<i>LAN</i>	<i>Local Area Network</i>
<i>LLC</i>	<i>Logical Link Control</i>
<b>M</b>	
<i>MAC</i>	<i>Media Access Control</i>
<i>MAC-hs</i>	<i>high speed Mac</i>
<i>MCS</i>	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
<i>ME</i>	<i>Mobile Equipment</i>
<i>MMS</i>	<i>Multimedia Messaging Service</i>
<i>MS</i>	<i>Mobile Station</i>
<i>MSC</i>	<i>Mobile Services switching Centre</i>
<i>MT</i>	<i>Mobile Terminal</i>
<b>N</b>	
<i>NSS</i>	<i>Network Switching Subsystem</i>
<i>NMS</i>	<i>Network Management Subsystem</i>
<b>O</b>	
<i>O&amp;M</i>	<i>Operation and Maintenance</i>
<i>OSS</i>	<i>Operation and Support System</i>
<b>P</b>	
<i>PCU</i>	<i>Packet Control Unit</i>
<i>PDC</i>	<i>Personal Digital Communications</i>
<i>PDP</i>	<i>Packet Data Protocol</i>
<i>PDU</i>	<i>Power Distribution Unit</i>
<i>PDU</i>	<i>Protocol Data Unit</i>
<i>PDU</i>	<i>Payload Data Unit</i>
<i>PLMN</i>	<i>Public Land Mobile Network</i>
<i>PS</i>	<i>Packet Switching</i>
<i>PSTN</i>	<i>Public Switched Telephone Network</i>
<i>PVC</i>	<i>Permanent Virtual Circuit</i>
<b>Q</b>	
<i>QoS</i>	<i>Quality of Service</i>
<i>QoE</i>	<i>Quality of Experience</i>
<b>R</b>	
<i>RAB</i>	<i>Radio Access Bearer</i>
<i>RAN</i>	<i>Radio Access Network</i>
<i>RB</i>	<i>Red Bayesiana</i>
<i>RF</i>	<i>Radio Frequency</i>
<i>RFC</i>	<i>Request for Comments</i>
<i>RLC</i>	<i>Radio Link Control</i>

<i>RLP</i>	<i>Radio Link Protocol</i>
<i>RSCP</i>	<i>Received Signal Code Power</i>
<i>RSSI</i>	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
<i>RTT</i>	<i>Round-Trip delay Time</i>
<i>RTSL</i>	<i>Radio Time Slot</i>
<b>S</b>	
<i>SAAL</i>	<i>Signaling ATM Adaptation Layer</i>
<i>SDU</i>	<i>Service Data Unit</i>
<i>SGSN</i>	<i>Serving GPRS Service Node</i>
<i>SINR</i>	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i>
<i>SM</i>	<i>Session Management</i>
<i>SIM</i>	<i>Subscriber Identity Module</i>
<i>SMS</i>	<i>Short Message Service</i>
<i>SNMP</i>	<i>Simple Network Management Protocol</i>
<i>SQI</i>	<i>Service Quality Indicator</i>
<i>SW</i>	<i>Software</i>
<b>T</b>	
<i>TCH</i>	<i>Traffic Channel</i>
<i>TCP</i>	<i>Transmission Control Protocol</i>
<i>TCP/IP</i>	<i>Transmission Control Protocol/ Internet Protocol</i>
<i>TDM</i>	<i>Time Division Multiplex</i>
<i>TDMA</i>	<i>Time Division Multiple Access</i>
<i>TFRC</i>	<i>Transport Format and Resources Combination</i>
<i>TPC</i>	<i>Tabla de Probabilidad Condicional</i>
<i>TSL</i>	<i>Time Slots</i>
<b>U</b>	
<i>UARFCN</i>	<i>UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number</i>
<i>UE</i>	<i>User Equipment</i>
<i>UL</i>	<i>Uplink</i>
<i>UMTS</i>	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
<i>URL</i>	<i>Uniform Resource Locator</i>
<i>UTP</i>	<i>UMTS Tunneling Protocol</i>
<i>UTRAN</i>	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
<b>V</b>	
<i>VC</i>	<i>Virtual Channel</i>
<i>VCI</i>	<i>Virtual Channel Identifier</i>
<i>VLR</i>	<i>Visitor Location Register</i>
<i>VP</i>	<i>Virtual Path</i>
<b>W</b>	
<i>WAP</i>	<i>Wireless Application Protocol</i>
<i>WCDMA</i>	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
<i>WiFi</i>	<i>Wireless Fidelity</i>
<i>16QAM</i>	<i>16 Quadrature Amplitude Modulation</i>

# Apéndice B

## Arquitectura de pruebas 1

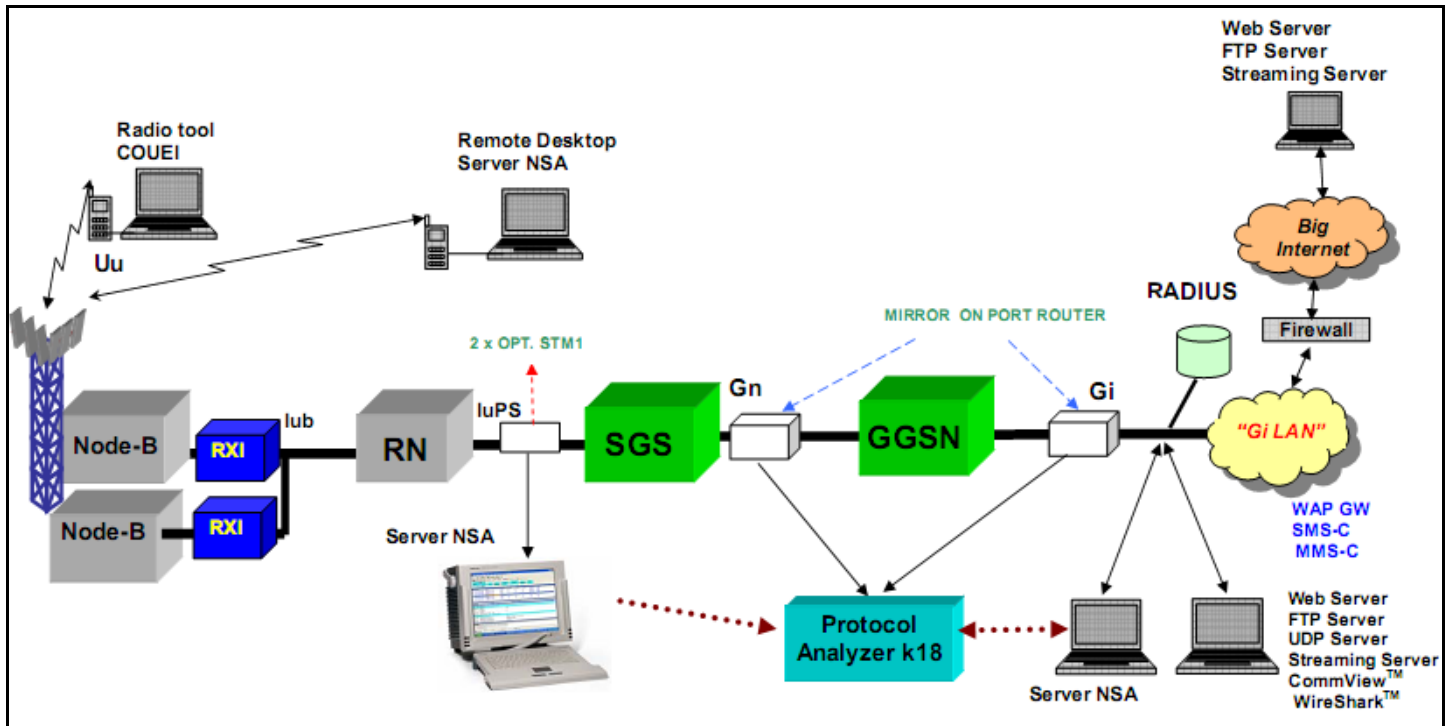


Ilustración 55 Arquitectura de Pruebas

# Apéndice C

## Accesibilidad HSDPA

RNC	CELL	FECHA	PInt_HS_A	PInt_HS_A
SAR04	U24001	21-12-2008	99,86	1439
SAR04	U24001	22-12-2008	100	7566
SAR04	U24001	23-12-2008	99,89	7274
SAR04	U24001	24-12-2008	99,85	4059
SAR04	U24001	25-12-2008	100	1294
SAR04	U24001	26-12-2008	99,89	5509
SAR04	U24001	27-12-2008	99,91	2327
SAR04	U24001	28-12-2008	99,89	1831
SAR04	U24001	29-12-2008	99,93	8469
SAR04	U24001	30-12-2008	99,92	6741
SAR04	U24001	31-12-2008	99,79	2750
SAR04	U24001	01-01-2009	99,98	830
SAR04	U24001	02-01-2009	99,9	2914
SAR04	U24001	03-01-2009	99,7	782
SAR04	U24001	04-01-2009	99,83	1044
SAR04	U24001	05-01-2009	99,87	7253
SAR04	U24001	06-01-2009	99,74	7480
SAR04	U24001	07-01-2009	99,78	7676
SAR04	U24001	08-01-2009	99,88	8521
SAR04	U24001	09-01-2009	99,94	7110
SAR04	U24001	10-01-2009	100	1541
SAR04	U24001	11-01-2009	99,75	1547
SAR04	U24001	12-01-2009	99,91	7792
SAR04	U24001	13-01-2009	99,87	7812
SAR04	U24001	14-01-2009	99,92	6387
SAR04	U24001	15-01-2009	99,95	7571
SAR04	U24001	16-01-2009	99,8	7278
SAR04	U24001	17-01-2009	99,7	1386
SAR04	U24001	18-01-2009	99,81	829
SAR04	U24001	19-01-2009	99,92	8620
<b>Promedio</b>			<b>99,87266667</b>	

Tabla 19 Porcentaje de accesibilidad para HSDPA

Donde:

- PInt\_HS\_A: Accesibilidad PS Data HS
- Pint\_HS A N: Cantidad de intentos de establecimientos RAB (para PS Data)

# Apéndice D

## Intervalo de los valores de los Parámetros

RSCP	
Valor = x (dBm)	Estado
$(x \geq -80)$	Good
$(-100 \leq x < -80)$	Medium
$(x < -100)$	Bad

Tabla 20 Intervalo de valores para nodo RSCP [25]

Ec/No	
Valor = x (dBm)	Estado
$(x > -10)$	Good
$(-15 < x \leq -10)$	Medium
$(x \leq -15)$	Bad

Tabla 21 Intervalo de valores para Ec/No [25]

CQI		
Valor = x (numérico)		Estado
$(x = 0),$	$(\text{SINR} \leq -3.5)$	Low
$(x = \text{SINR}[\text{dB}] + 3.5),$	$(-3.5 < \text{SINR} < 26.5)$	Medium
$x = 30,$	$(\text{SINR} \geq 26.5)$	Good

Tabla 22 Intervalo de valores para CQI [26]