

Informe del Proyecto de Fin de Carrera
“Proyecto 3G”

Integrantes: *Pablo Giordano*

Marcos Quagliotti

Ianai Urwicz

Tutor: *Ing. Pablo Belzarena*

*Instituto de Ingeniería Eléctrica – Facultad de Ingeniería
UDELAR – 16 de junio de 2008*

Índice

1. Resumen	6
2. Introducción	7
2.1. Marco del proyecto	7
2.2. Antecedentes del convenio	7
2.3. El convenio sobre 3G	7
2.4. ¿Qué hace la herramienta implementada?	8
2.5. Ojetivos y organización de este documento	9
3. Introducción a 3G	11
3.1. La Tercera Generación - 3G	11
3.1.1. Arquitectura de la Red 3G	11
3.2. WCDMA	13
3.2.1. División por códigos	13
3.2.2. Spreading factor y códigos OVSF	14
3.2.3. Códigos de scrambling	16
3.3. UMTS Release 99	16
3.4. HSDPA	17
3.5. Servicios de tercera generación	18
3.6. Recursos de hardware	19

3.7. Posibles configuraciones de la radio base	19
4. Determinación de casos de uso	21
5. Modelado	24
5.1. ¿Qué se quiere modelar?	24
5.2. Modelo tomado como referencia	25
5.2.1. Dimensionado del Uplink	25
5.2.2. Dimensionado del DownLink	31
5.2.3. Dimensionado por hardware	38
5.2.4. Dimensionado final de Nortel	38
5.3. Qué elementos no contempla y modificaciones del mismo	39
5.4. Fundamentos del modelo utilizado	41
5.4.1. Región por potencia: R99	44
5.4.2. Criterios para el corte de la cadena	47
5.4.3. Región por potencia con HSDPA	50
5.4.4. Región por potencia: enfoque final	51
5.4.5. Región por códigos	51
5.4.6. Región por hardware	53
5.4.7. Solución de la matriz de estados	54
5.5. Modelado de los servicios y la celda	59
5.5.1. La Celda	59

5.5.2. Servicios	60
5.6. ¿Qué más modelar?	61
6. Desarrollo de software	65
6.1. Análisis y Diseño del Software	65
6.2. Implementación del Software	69
6.2.1. Paquete umts	69
6.2.2. Paquete herramientas	71
6.2.3. Paquete casos de uso	72
6.2.4. Paquete interfaz	73
6.3. Diagramas de interacción	74
6.4. Algoritmos y métodos numéricos	77
6.4.1. Obtención de la cadena de Markov	78
6.4.2. Resolución de $\pi * Q = 0$	81
6.4.3. Iteraciones	82
6.5. Problemas planteados en esta etapa	84
7. Validación del software	86
7.1. Bloqueos R99	86
7.2. Crecimiento proporcional	87
7.3. Bloqueos R99 + HSDPA	88
7.4. Maximizar arribos HSDPA	89

7.5. Arribos respetando R99 y $UEth_{MIN}$ garantizado	90
8. Resultados y análisis	92
8.1. Celda homogénea: ¿cuántos Erlangs soporta mi celda?	92
8.2. Conjunto de servicios: ¿Necesidad o no de otra portadora?	94
8.3. Voz sobre GSM	99
8.4. ¿Limitante por CEM o por potencia?	100
8.5. HSDPA: elefantes vs ratones	101
9. Perspectivas del software a futuro	104
9.1. Dimensionamiento en HSUPA	104
9.1.1. Introducción a HSUPA	105
9.1.2. Modelado del servicio HSUPA	106
9.1.3. ¿Cómo agregar HSUPA al <i>GGG Dimensioning Tool</i> ?	111
9.2. Modelo potencia en un punto	113
9.3. Simulación para obtener MUG y $UEth1$	114
10. Conclusiones	116
11. Agradecimientos	117
12. Anexo A: Manual de usuario	118
13. Anexo B: Cadenas de Markov	128

14. Anexo C: Gestión de proyecto	134
14.1. Transcurso del proyecto	134
14.1.1. El plan	134
14.1.2. Transcurso real	137
14.2. Recursos y dedicación de horas	138
14.2.1. Dedicación	138
14.2.2. Costos del proyecto	138
15. Anexo D: Contenido del CD	139
Bibliografía	140

1. Resumen

El proyecto trata el problema de obtener una herramienta basada en software, útil para el dimensionamiento de una celda de tercera generación de celulares (3G). El software desarrollado e implementado resuelve diferentes casos de uso especificados por el cliente con el fin de obtener información cualitativa y cuantitativamente útil a los efectos del dimensionamiento y diagnóstico de una radiobase. El presente documento detalla los diferentes componentes y etapas que se recorrieron para arribar a la solución final. Entre estas etapas encontramos el estudio de la nueva tecnología, el modelado de una radiobase, la definición conjuntamente con el cliente de los casos de uso de interés, el desarrollo del software y el análisis y validación de resultados.

2. Introducción

2.1. Marco del proyecto

El proyecto de grado “GGG Dimensioning Tool” tuvo lugar dentro del convenio entre ANTEL y la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. Uno de los objetivos de dicho convenio es la implementación de una herramienta de análisis que permita diagnosticar y dimensionar una celda 3G. Dicho objetivo fue el que se planteó al grupo de proyecto desde el inicio. Vale mencionar que el hecho de haber tenido que realizar esta experiencia de grado como parte de un emprendimiento bilateral con las características del mencionado convenio, revistió a este proyecto de una similitud considerable a un proyecto típico del ejercicio profesional del ingeniero como parte de una empresa de telecomunicaciones. Lo anterior se sostiene en el hecho de que se trabajó a la par de ANTEL, compartiendo las necesidades que el ente tiene como operador de telecomunicaciones, entendiendo de manera conjunta las complejidades de una tecnología nueva como lo es 3G, y las necesidades técnicas a la hora de desplegar una nueva red.

2.2. Antecedentes del convenio

El convenio sobre 3G fue antecedido por uno de características similares que tuvo por objetivo el análisis de la performance de la Red de GSM/GPRS de ANTEL. El mismo generó, entre otros valores, el software “Analizador GSM/GPRS” (AGG). Fue desarrollado en Java, lo que condicionó al actual proyecto a desarrollar la herramienta que aquí se presenta en el mismo lenguaje que la anterior de modo que pudieran compartir la mayor cantidad de librerías.

2.3. El convenio sobre 3G

Es importante a los efectos de presentar este proyecto de grado, explicitar algunos de los aspectos más relevantes en lo que tiene que ver con la motivación, necesidades y dinámica del convenio de 3G.

Ante la necesidad de evolucionar a la tercera generación de redes celulares, ANTEL comenzó a desplegar su Red 3G. El hecho de tratarse de una tecnología nueva, implica un proceso desde el punto de vista técnico que involucra el aprendizaje teórico de la nueva tecnología, así como la necesidad de hacer experiencia en cuanto a dimensionamiento y ajuste de los diversos factores involucrados. Para cubrir los aspectos mencionados, ANTEL y la Facultad de Ingeniería se dieron cita semanalmente para presentar en cada oportunidad un tema referente sobre 3G. Esta actividad se extendió entre los meses de abril y julio, y tuvo entre otros objetivos, introducir a todo el equipo de trabajo la nueva tecnología y uniformizar el conocimiento básico entre todos los involucrados. La presentación sobre calidad de servicio en 3G (QoS) nos fue asignada, presentando la misma en junio de 2007. Además, uno de nuestros integrantes asistió a un curso interno de ANTEL sobre UMTS dictado por personal de Alcatel.

Una vez concluidos los seminarios y el curso, aproximadamente a principios de Agosto, se procedió a definir cuatro grupos de trabajo: Dimensionamiento, Simulaciones, Mediciones y Calidad de Servicio. Uno de nuestros integrantes formó parte del grupo de Simulaciones, sobre todo haciendo de nexo entre éste grupo y el de Dimensionado, pero también buscando información acerca de los simuladores de capa física de licencia libre disponibles. Sin embargo la participación más importante la tuvimos dentro del grupo de Dimensionado, interactuando con nuestro cliente y nuestro tutor de proyecto el Ing. Pablo Belzarena. Todo este proceso definió las necesidades concretas de ANTEL respecto a un software de análisis de 3G. El mismo fue implementado por este grupo de trabajo a modo de proyecto de fin de carrera y se presenta en este documento.

2.4. ¿Qué hace la herramienta implementada?

De forma breve se puede decir que el software implementado recibe por parte del usuario los parámetros de entrada correspondientes al caso de uso que se desee correr, y genera mediante la resolución de un modelo analítico basado en cadenas de Markov, resultados de salida como ser probabilidades de bloqueo por servicio, throughput asegurado por usuario, potencia necesaria, entre otros parámetros de dimensionamiento. La idea es poder hacer lo anterior cubriendo las necesidades del cliente, pero manteniendo a la vez practicidad y sencillez, de modo que permita a los técnicos e ingenieros de ANTEL obtener un panorama de cómo afectan a la performance de la Red

3G los diferentes factores involucrados.

El desarrollo del software debe permitir que en el futuro el cliente pueda implementar su propia interfaz gráfica sin necesidad de involucrarse en la implementación de los algoritmos que resuelven los diferentes casos de uso. También debe ser diseñado teniendo en cuenta que otro grupo de trabajo podrá tomar el software para extender funcionalidades en base a las tecnologías y modelos actualmente cubiertos, o bien podrá añadir estudios sobre tecnologías actualmente no implementadas como ser HSUPA.

2.5. Ojetivos y organización de este documento

El objetivo primario de este documento es presentar nuestro trabajo como proyecto de grado, pero también facilitar el trabajo de quienes continúen ampliando el software, así como brindar un manual de usuario basado en la interfaz gráfica diseñada por nosotros. También se pretende dar un panorama de las funcionalidades que se podrían agregar en el futuro, junto con una idea de cómo lograrlo. En el sentido anterior, el presente escrito asume que el lector cuenta con nociones básicas de 3G, concretamente Release 99 y HSDPA, así como algún acercamiento a desarrollo de software orientado a objetos, conceptos generales sobre redes celulares de telefonía móvil y análisis de performance de redes basado en cadenas de Markov.

La documentación continúa entonces presentando las principales características de 3G (sección 3), haciendo énfasis en los conceptos centrales a la hora de explicar las necesidades de nuestro cliente y el modelo ajustado del sistema celular en cuestión. Pasaremos luego a la presentación de los casos de uso definidos por el cliente (sección 4), lo que nos dejará en condiciones de explicar el modelo utilizado del sistema objeto de estudio (sección 5). Posteriormente se documenta el desarrollo de software (sección 6) remarcando la arquitectura del mismo, y el papel que juegan las diferentes clases de software definidas. Le sigue al desarrollo de software, un estudio de la performance del mismo, basado en el análisis de resultados de los diversos casos de uso (secciones 7 y 8). Dicho análisis incluye validar los resultados con otros de otras fuentes, y a su vez variar los parámetros pertinentes para estudiar cómo varían los resultados. Lo anterior nos permitirá por un lado, verificar que exista coherencia entre la variación de las entradas y su correspondiente efecto en las salidas (siempre que sea posible predecir un comportamiento correcto) y por otro lado concluir cualitativamente acerca de la performance

de una radio base 3G, como si se tratara de un operador de telefonía que utiliza la herramienta para dimensionar su red. Una vez finalizado el análisis de resultados, vamos a dar un panorama en términos generales de las posibles ampliaciones a futuro del “GGG Dimensioning Tool” y una idea de cómo realizarla (sección 9). Posteriormente se hará un análisis de los tiempo involucrados en la realización del proyecto que servirá de preámbulo para las conclusiones del mismo. Por último se presentan las referencias. En cuanto a los anexos, hemos considerado la necesidad de realizar: el manual de usuario del “GGG Dimensioning Tool” (sección 12); otro anexo que resuma las herramientas matemáticas más importantes del proyecto (sección 13), y por último un anexo que resuma la gestión del proyecto (sección 14).

3. Introducción a 3G

En esta sección se realiza una introducción a la tecnología de Tercera Generación (3G) de telefonía celular, presentando los aspectos más relevantes al proyecto. También se pretende plantear los puntos clave a la hora de realizar el dimensionamiento de una celda 3G como la considerada en este trabajo.

3.1. La Tercera Generación - 3G

Las redes celulares de tercera generación, representan el paso siguiente a GSM/GPRS hacia la convergencia de servicios de datos y voz sobre redes celulares. Esta tendencia llevará, en el futuro, a tener todos los servicios que hoy conocemos y más, sobre redes completamente de paquetes (redes IP). Sin embargo, las redes que nos ocupan aquí, posibilitan brindar de manera simultánea servicios de voz y datos, pero manteniendo los primeros sobre circuitos conmutados, y agregando los de datos como servicios de paquetes, eventualmente de tipo “best effort”. Concretamente, una de las soluciones dadas por 3G, consiste en contar con un acceso en la interfaz de aire basado en WCDMA¹ por sobre el cual se implementan UMTS² Release 99 y HSDPA³.

3.1.1. Arquitectura de la Red 3G

La arquitectura de la red 3G se diseñó de modo que la transición se pudiera hacer con el menor cambio posible respecto a la arquitectura de 2G. El principal cambio radica en el acceso. En 3G, el equivalente al BSS⁴ de GSM/GPRS es el UMTS Terrestrial Radio Access Network (*UTRAN*). Hay dos grandes cambios en la UTRAN respecto al BSS: primero encontramos que los Radio Network Controller (*RNC*), equivalentes al las BTS's⁵, se encuentran interconectados. Lo anterior posibilita mejoras, por ejemplo a la hora de realizar el handover. Sin embargo el cambio más importante, y el que más nos interesa aquí es el de la interfaz de aire, ya que 3G utiliza Wi-

¹Wideband Code Division Multiple Access

²Universal Mobile Telecommunications System

³High Speed Downlink Packet Access

⁴Base Station Subsystem

⁵Base Transceiver Station

deband Code Division Multiple Access (*WCDMA*). Continuemos entonces presentando los principales aspectos de *WCDMA*.

Convención: en este documento se entenderá por célula o radio base, a la totalidad del área irradiada por potencia transmitida por un Nodo B dado (área de cobertura de la radio base). Asimismo se usarán indistintamente los términos celda y sector, para referirse a las subdivisiones de una misma célula. A menos que se especifique lo contrario, consideraremos tres sectores por célula.

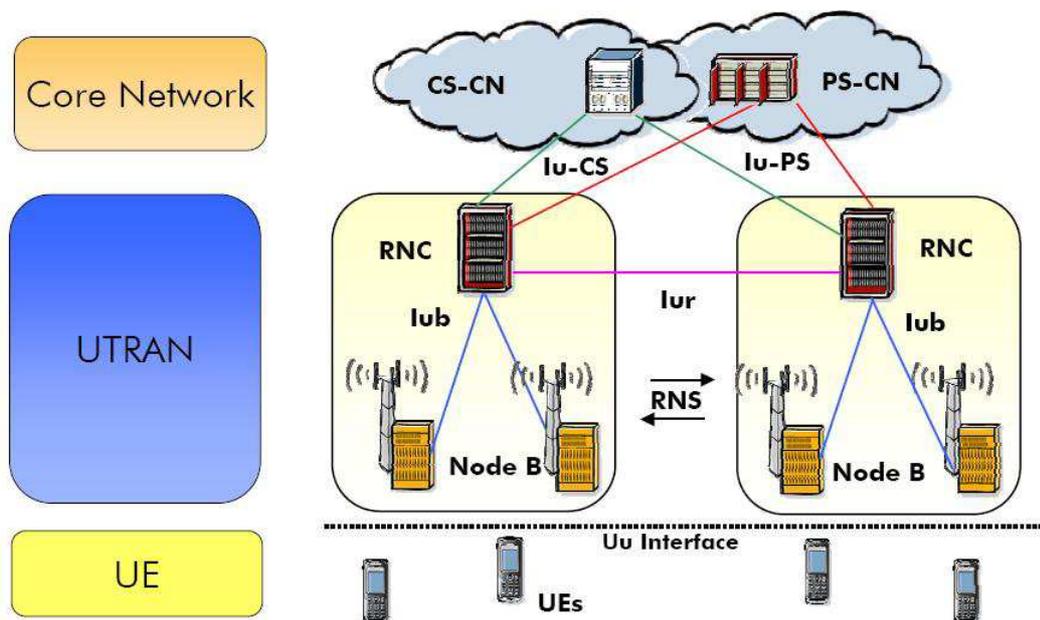


Figura 1: Arquitectura de la red 3G

La figura anterior muestra la arquitectura de una red 3G. Su principal característica se encuentra en la UTRAN⁶. La UTRAN se compone de los RNC⁷ los cuales, si bien son el equivalente de los BSC⁸ de 2G, en 3G se encuentran interconectados posibilitando entre otras cosas el *soft handover*. El gran cambio que presenta 3G se da en la interfaz de aire en donde el acceso al medio se resuelve con WCDMA⁹.

⁶UMTS Terrestrial Radio Access Network

⁷Radio Network Controller

⁸Base Station Controller

⁹Wide-Band Code Division Multiple Access

3.2. WCDMA

Se comienza describiendo lo que a nuestro juicio representa el cambio más significativo respecto a GSM/GPRS: WCDMA como interfaz física en el acceso de radio.

3.2.1. División por códigos

A diferencia de otras tecnologías de acceso al medio, WCDMA se basa en la división por códigos para distinguir entre el tráfico de distintas fuentes. En una primera aproximación, podemos explicar la tecnología de la siguiente manera: cada flujo de tráfico, es “multiplicado” por un código antes de ser enviado por la interfaz de aire. El código usado en un flujo, no se utiliza para ningún otro. Además todos los códigos utilizados para el procedimiento anterior, son ortonormales entre sí. Esto último significa que se anula el producto de un código por otro diferente, mientras que el producto de un código consigo mismo da uno. De esta manera, en recepción lo que se tiene es la suma o superposición de todas las señales, por lo cual multiplicando todo por el código perteneciente a la señal que se pretende recuperar, se anularán todas las otras. Sin embargo, en la práctica los códigos no son perfectamente ortonormales por diversas razones como ser desfasajes temporales por multicamino, uso de códigos de *scrambling* para distinguir entre tráfico de radio bases vecinas, etc. Lo anterior hace que en recepción, las señales de los demás terminales 3G (*UE's*¹⁰) se vean como interferencia a la hora de recuperar el mensaje original.

Un ejemplo clásico que ilustra lo anterior es el de un restaurante con mesas, en cada una de las cuales los comensales hablan un mismo idioma, pero distinto al idioma de otras mesas. Entonces todos entienden lo que los comensales de su propia mesa dicen, pero si las personas de las otras mesas comienzan a gritar, todos tenderán a hacer lo mismo porque ya no se escuchan con claridad, y llegará un punto en el cual no importa cuan fuerte griten, nadie podrá entender lo que dice el otro y el sistema colapsa. Exactamente lo mismo pasa en *WCDMA* donde los diferentes idiomas son los códigos ortonormales, y el volumen con que hablan los comensales es la potencia de transmisión de cada UE.

¹⁰User Equipment

De lo anterior se concluye que en sistemas basados en WCDMA, el control de la potencia que irradia cada UE es vital para que el sistema no colapse y para aprovechar al máximo la capacidad del mismo. Más aún, incluso si se cuenta con un control de potencia perfecto, la cantidad de UE's que podrán compartir la celda es finita, ya sea porque se agotan los códigos ortonormales disponibles, o porque el sistema es incapaz de aceptar más potencia interferente en recepción, y por lo tanto no permitirá el acceso de otro UE. En la práctica, llega un momento en el que la cantidad de usuarios presentes en el sistema hace que el mismo se torne inestable debido a que el ingreso de un usuario más en el sector, supone un aumento muy grande en la potencia de transmisión de cada UE. Lo anterior generaría una suerte de *efecto ping-pong*, en el cual los comensales cambiarían constantemente su volumen entre hablar normal y gritar, lo que se traduce en inestabilidad.

Los conceptos expuestos arriba, son de suma importancia a los efectos de este proyecto, ya que los dos recursos más escasos y determinantes en la performance de un sistema basado en *WCDMA* son: *la potencia interferente*; y *la cantidad de códigos ortonormales disponibles*. Entonces utilizar eficientemente estos recursos deriva en el aprovechamiento al máximo de la capacidad del sistema. Lo anterior implica, entre otras cosas, algoritmos eficientes de control de acceso al la radio base.

De esta manera, y adelantándonos a la próxima sección, modelar correctamente la forma en que se limita la cantidad de usuarios en una celda 3G, es crucial si se pretende basar el modelo del sistema en cadenas de Markov. Por otro lado, estos recursos son los que a la postre determinan la máxima capacidad de la celda en términos de tráfico ofrecido, y por ende determinan los parámetros de dimensionamiento usualmente de interés para los operadores como lo son erlangs ofrecidos, probabilidad de bloqueo, throughput obtenido, entre otros.

3.2.2. Spreading factor y códigos OVSF

En *WCDMA* se transmiten bits a una tasa constante de 3.84Mhz por RF. Estos bits no son los bits de información, por lo cual reciben el nombre distintivo de *chips*. El *spreading factor*(SF) se define entonces como la tasa de chips (*3.84Mhz*), sobre la tasa de transmisión de datos en banda base. El SF coincide con el largo (en cantidad de chips) del código utilizado sobre la señal transmitida. Por ejemplo, si queremos transmitir una señal a *240Kbps*,

deberemos usar códigos de $3840kcps/240Kbps = 16$ chips de largo, o lo que es lo mismo, códigos de SF 16. Los códigos de menor SF permiten una mayor tasa de transferencia de datos, ya que precisan menos chips para codificar un bit. Los códigos son un recurso escaso debido a que la propiedad de que sean ortonormales reduce las combinaciones posibles y por lo explicado anteriormente reciben el nombre de códigos *Orthogonal Variable Spreading Factor* (OVSF). Estos códigos se pueden obtener de un setting organizado en forma de árbol. La siguiente figura ilustra lo anterior.

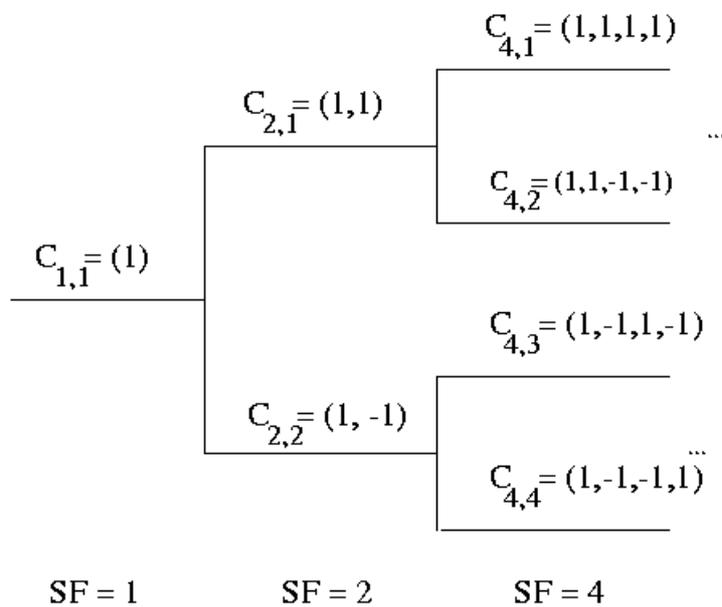


Figura 2: árbol de códigos OVSF.

Observemos en la figura, que la secuencia de chips de un código dado, está incluida en los códigos de las ramas del árbol que nacen del mismo. Esto implica que de utilizarse simultáneamente el código $C_{2,2} = 1, -1$ con el $C_{4,3} = 1, -1, 1, -1$ por ejemplo, las señales se *confunden* ya que la secuencia $-1, 1$ pertenece a ambos códigos, y eso hace que se pierda la ortogonalidad entre los mismos. Por lo tanto una vez que se asigna un determinado código, quedan descartados todos aquellos que *desciendan* del anterior. Esto supone una limitación importante en la cantidad de códigos OVSF disponibles. Entonces, si tenemos en cuenta que los canales de control son en su mayoría de SF 128 y 156, en la práctica se podrá tener en uso hasta un máximo de 3 códigos de SF 4, ó 7 de SF 8, ó 15 de SF 16 y así. Lo anterior se torna determinante en la capacidad del Downlink, en donde sólo se cuenta con un único árbol de

códigos, y por ende el sector quedaría saturado simplemente con 7 usuarios que requieran un servicio de SF 8 de bajada. Sin embargo esto no sucede en el Uplink debido al uso de *scrambling codes*.

3.2.3. Códigos de scrambling

En 3G se usan también otros códigos distintos a los ortonormales: los *scrambling codes* (SC). Estos códigos no modifican el ancho de banda de la señal transmitida por el aire, ni la tasa de chips. Se utilizan en el DL para diferenciar entre el tráfico de cada radio base, y en el UL para diferenciar las señales de los distintos UE's.

En el DL, cada radio base cuenta con un único SC primario y 16 SC secundarios. En la práctica se trata de utilizar sólo el SC primario en cada radio base. Si bien utilizar los secundarios amplía la cantidad de códigos OVSF disponibles, también hace que los mismos pierdan ortonormalidad y por lo tanto aumenta el piso de interferencia de la celda, lo cual degrada la calidad y reduce la capacidad. Es por esto que en general, el dimensionamiento en el DL se realiza considerando que sólo se cuenta con un único árbol de códigos por sector. La situación cambia en el UL, ya que la cantidad de SC disponibles es mayor, y su utilización es menos problemática que en el DL. De este modo la cantidad de códigos OVSF disponibles para el UL es tal que no se considera a los efectos del dimensionamiento ya que no representa una limitante.

3.3. UMTS Release 99

En esta sección introducimos los principales conceptos de lo que llamaremos Release 99 o simplemente *R99*. Se conoce por *R99* al conjunto de normas iniciales de UMTS publicadas en 1999. Esta especificación es la base de la mayoría de los sistemas celulares de tercera generación, y es uno de los estándares desplegados por nuestro cliente. Comencemos mencionando que la mayor diferencia con estándares de telefonía celular anteriores, es que posibilita el uso simultáneo de servicios *circuit switched (CS)* y *packet switched (PS)* por un mismo terminal móvil de tercera generación *UE*¹¹. Esto contrasta, por ejemplo, con *2G* en donde el usuario sólo podía utilizar su móvil

¹¹User Equipment

o bien para voz (sobre GSM) o bien para datos (sobre GPRS) pero no voz y datos simultáneamente.

El principal concepto de *R99* ligado a este proyecto es el de *Radio Access Bearer (RAB)*. El *RAB* puede entenderse como un tubo de ancho de banda constante y dedicado. Cuando un UE solicita el establecimiento de un servicio, el *RNC*¹² solicita, dependiendo del servicio en cuestión, el establecimiento de un RAB en el *Uplink*¹³ (UL) con un ancho de banda determinado, y otro RAB para el *Downlink* (DL) con eventualmente un ancho de banda diferente al anterior. El ancho de banda de un RAB, implica de forma unívoca el uso de un código ortogonal de SF determinado. Estos canales de subida y bajada, necesitan reservar recursos, a saber potencia de transmisión y códigos OVFSF. Los recursos se reservan hasta que el UE deje el servicio, más allá de que el RAB se use o no. Esto es positivo desde el punto de vista de calidad de servicio, ya que reservar recursos de este modo posibilita asegurar bajos retardos, pérdidas controladas, etc. permitiendo así asegurar QoS. Sin embargo supone un costo grande a la hora del uso eficiente de los recursos de radio, ya que aunque el usuario no se encuentre activo, el RAB permanece dedicado y los recursos no pueden ser utilizados por otro móvil con necesidad real de transmisión. Para paliar lo anterior, surge *HSDPA*¹⁴ como alternativa para brindar servicios de paquetes permitiendo además mayores velocidades de bajada.

3.4. HSDPA

High Speed Downlink Packet Access es una optimización especificada por el 3GPP¹⁵ en su Release 5. El uso práctico con que se ha desplegado este estándar, es brindar servicios *best effort* de paquetes. Las diferencias con R99 son varias. Para empezar existe un único canal HSDPA en el DL para la bajada de datos. Ese canal es compartido por todos los UE's de la celda que usen HSDPA. Un canal compartido es más eficiente desde el punto de vista del operador, porque se logra una mayor ganancia por multiplexado a medida que la cantidad de usuarios que comparten el canal crece. Otra diferencia sustancial, es que los códigos que se utilizan en el DL de HSDPA son de SF fijo en 16. Esto no limita la velocidad de descarga de un usuario al

¹²Radio Network Controller

¹³Sentido de transmisión de datos desde el UE a la radio base o Nodo B

¹⁴High Speed Downlink Packet Access

¹⁵3rd Generation Partnership Project

ancho de banda de un RAB de SF 16, ya que en HSDPA un mismo UE puede ser servido con varios códigos simultáneos, pudiendo obtener un throughput máximo teórico de 14.4Mbps. En el uplink, HSDPA abre RAB's para cada usuario como si se tratara de servicios R99. Lo anterior trae como consecuencia que la implementación de HSDPA en una radio base, utilice una cantidad apreciable de recursos de R99, a saber, códigos OVSF, potencia de transmisión, y aumenta el piso de interferencia ya que agrega canales de control que no existen en R99.

En HSDPA, el throughput máximo que puede obtener un UE siendo este el único usuario HSDPA, depende de diversos factores: la potencia de la radio base destinada a HSDPA, la cantidad de códigos de SF 16 reservados para HSDPA (hasta un máximo de 15) y la distancia a la que se encuentra el móvil de la radio base. Asimismo, a medida que aumenta el número de usuarios compartiendo el canal HSDPA, aumentará el throughput de la radio base debido a la ganancia de multiplexado, y bajará el throughput promedio por usuario debido a que las misma cantidad de recursos debe ser compartida con mayor cantidad de usuarios.

Los recursos de HSDPA se reasignan cada 2 milisegundos. Dicha tarea se realiza en el Nodo B, y el algoritmo de scheduling¹⁶ de recursos depende de la configuración seteada, y del proveedor del Nodo B. Por ejemplo, entre los algoritmos más populares tenemos: Round Robin (RR), Máximo C/I y Proportional Fair Scheduling (PFS). El segundo de los anteriores asigna la totalidad de los recursos disponibles en cada TTI ¹⁷ al UE que tenga la mejor relación señal-interferencia (C/I). Si bien está comprobado que este algoritmo maximiza el throughput de la celda, deja prácticamente en cero a usuarios lejanos a la radio base. Para evitar lo anterior surgen algoritmos de agendado como el PFS, que equilibran el compromiso entre maximizar el throughput de la celda, y distribuir con relativa justicia los recursos entre todos los usuarios.

3.5. Servicios de tercera generación

La principal motivación de la evolución de la redes y la convergencia de las misma es poder brindar servicios de carácter global, sobre cualquier red de datos. En ese sentido 3G trae consigo algunos conceptos que posibilitan

¹⁶agendado

¹⁷Transmission Time Interval

la definición de servicios atractivos para los clientes. Como se mencionó anteriormente, cuando un terminal solicita el establecimiento de un servicio, el RNC decide, en base a la definición hecha por el operador y los parámetros de calidad de servicio seteados, qué RAB utilizar. En este documento se hará referencia a los RAB's por su ancho de banda a nivel de lo que sería la segunda capa de la UTRAN, la capa *RLC*¹⁸.

3.6. Recursos de hardware

Entre los diversos recursos de hardware, cabe mencionar aquí que los equipos de nuestro cliente, concretamente los Nodos B adquiridos, cuentan con una capacidad limitada de elementos de procesamiento en banda base denominados *channel elements* (CE's). Cada RAB se mapea en una cantidad de CE's necesarios para su procesamiento. A mayor ancho de banda, mayor cantidad de CE's necesarios para procesar dicho RAB. Por ejemplo, un RAB de 384Kbps necesita 9 CE's. Los CE's disponibles en un Nodo B, son compartidos por los tres sectores de la célula. En general los Nodos B comercializados permiten ampliar la capacidad de channel elements, pero lo anterior implica un costo, por lo que se torna necesario para los operadores, evaluar la real necesidad de tal ampliación. Pasemos ahora a introducir el último aspecto importante sobre 3G a la hora del despliegue de la red.

3.7. Posibles configuraciones de la radio base

Dada una portadora 3G, es decir 5Mhz de espectro destinados al UL y 5Mhz más destinados al DL, existen cuatro posibilidades de configuración de la misma:

- sólo R99
- sólo HSDPA
- una porción de la potencia total disponible para HSDPA, y el resto para R99 (potencia fija)

¹⁸Radio Link Control

- la potencia no utilizada por R99, se aprovecha para HSDPA (potencia *on demand*)

Eventualmente es necesario que los operadores tengan dos portadoras en una misma radio base para cubrir su demanda de tráfico. En ese caso es de interés determinar cuál es la mejor combinación de configuraciones de una y otra portadora. Por ejemplo, en una etapa de despliegue de la Red puede ser eficiente contar con una única portadora configurada con potencia *on demand*, pero si se cuenta con dos portadoras, puede no ser tan claro que las dos portadoras configuradas con potencia a demanda sea la mejor opción.

Teniendo en cuenta los conceptos introducidos en esta sección, pasemos ahora al detalle del modelado de nuestro sistema. Si se desea ampliar sobre éstos conceptos y otros relacionados con 3G, recomendamos la lectura de [2].

4. Determinación de casos de uso

Es esta sección presentaremos de manera informal los diferentes casos de uso (CU) definidos. Estos CU fueron determinados a partir de las reuniones con ANTEL. En dichas reuniones el cliente fue formulando sus necesidades para con el software de dimensionamiento. Cabe recalcar que debido a la poca experiencia de ANTEL en 3G, el proceso de definición de los CU fue iterativo, completándose a medida que se ganaba experiencia con la tecnología.

Para la versión del software presentado en este documento, se definieron siete casos de uso. Estos son:

1. *Bloqueo de servicios R99 (por potencia o por códigos)*
2. *Bloqueo de servicios R99 + HSDPA (por potencia o por códigos)*
3. *Bloqueo por Channel Elements (CE)*
4. *Crecimiento global*
5. *Potencia fija: arribos máximo de HSDPA*
6. *Potencia on demand: tasa de arribo máxima en HSDPA*
7. *Potencia on demand: throughput HSDPA asegurado por UE*

Pasemos entonces a describir el propósito de cada uno de los CU, así como su funcionamiento desde el punto de vista *entrada-salida*.

1 - *Bloqueo de servicios R99 (por potencia o por códigos)*

En este CU se pretende encontrar la probabilidad de bloqueo por servicio de R99. El usuario ingresa la configuración de la celda así como el perfil de tráfico de cada servicio R99 definido (tasa de arribos, duración media del tiempo de permanencia, etc.). El software devuelve la probabilidad por servicio, de que a un usuario que desea acceder al sector le sea negado el servicio, a esto lo llamaremos simplemente *probabilidad de bloqueo* o bloqueo, y salvo que se indique otra cosa estará siempre asociado a un servicio. En este caso de uso, el recurso que se considera a la hora de permitir o denegar el acceso de un UE a un determinado servicio, es o bien el nivel de interferencia presente en la celda o bien la cantidad de códigos OVSF disponibles. El usuario indica qué criterio utilizar para determinar los bloqueos.

2 - Bloqueo de servicios R99 + HSDPA (por potencia o por códigos)

Este caso es muy similar al anterior, sólo que además de los servicios de R99 también se tiene servicios HSDPA. Como los servicios HSDPA son *best effort* no tiene sentido devolver una probabilidad de bloqueo de los mismos. Sin embargo, HSDPA tiene influencia en los bloqueos R99, y además el caso de uso devuelve el throughput promedio por usuarios HSDPA, así como el número medio de usuarios y el throughput HSDPA de la celda.

3 - Bloqueo por Channel Elements (CE)

Este CU es similar al anterior, sólo que aquí la limitación en la cantidad de UE's admitidos, viene dada por la cantidad de CE's con que cuenta la radio base. Otra diferencia es que los CE's se comparten entre todos los sectores de la célula, por lo cual el usuario define los servicios existentes en cada sector; obsérvese que los perfiles de tráfico pueden variar de un sector a otro para un mismo servicio. Lo anterior permite contemplar asimetrías presentes en las radio bases reales, donde la demanda de un determinado servicio puede ser mayor en uno de los sectores.

4 - Crecimiento global

La idea en este caso, es poder definir una mezcla de servicios para la celda, y obtener como salida las máximas tasa de arribo por servicio que se pueden admitir, sin que los bloqueos resultantes superen un umbral definido por el usuario. El nombre elegido se debe a que se pretende analizar una mezcla de servicios, en los que las proporciones de demanda entre los servicios se conservan, pero la demanda general crece, y lo que se tiene es un crecimiento proporcional que resultará en un aumento del bloqueo por servicio (ya que la capacidad de la celda no varía).

5 - Potencia fija: arribos máximo de HSDPA

El objetivo en este caso de uso es poder analizar, en un escenario de potencia fija para HSDPA, cuál es la tasa de arribos máxima de usuarios HSDPA si se desea poder asegurarles un determinado throughput mínimo. Hay que resaltar que en este caso no se tiene en cuenta ninguna condición sobre los bloqueos R99.

6 - Potencia on demand: tasa de arribo máxima en HSDPA

Aquí el propósito es considerar una celda 3G con una mezcla de servicios R99 y HSDPA definida por el usuario, más una condición en el throughput mínimo que se quiere garantizar a los usuarios HSDPA. En las condiciones anteriores, el CU devuelve la máxima tasa de arribos de usuarios HSDPA que hace que el throughput de los mismos sea mayor o igual al mínimo seteado, y además los bloqueos en los servicios R99 no superen el umbral definido.

7 - Potencia on demand: throughput HSDPA asegurado por UE

Este CU complementa al anterior. Esta vez lo que se conoce es la tasa de arribos de usuarios HSDPA, y se desea establecer cuánto throughput es posible asegurar por usuario, respetando los bloqueos máximos definidos para R99, y dada la demanda y mezcla de servicios de R99.

Los anteriores casos de uso suponen herramientas a la hora del dimensionamiento y diagnóstico de la performance de una celda. Cada uno de ellos por separado, no brinda una imagen completa de la capacidad de la celda, pero consideramos que usados de manera inteligente, complementando y realimentando los resultados de uno en otros, el operador podrá cubrir los aspectos más importantes del análisis.

5. Modelado

La presente sección tiene el siguiente objetivo: tratar de explicar el problema que se quiere resolver, de qué modelo se partió y cómo se modificó el mismo para cubrir las necesidades del proyecto. Como en todo modelo, lo que se intenta es representar los aspectos de la realidad que nos interesa analizar, de la manera más práctica y sencilla posible.

5.1. ¿Qué se quiere modelar?

Se quiere modelar la dinámica de una mezcla de servicios brindados sobre una celda 3G. Para ello es necesario modelar el control de acceso a la celda, así como la variación de los recursos de radio disponibles.

Requerimientos del modelo

El modelo ajustado deberá posibilitar la obtención de parámetros de dimensionamiento y análisis de performance de una celda de tercera generación de telefonía celular. Entre los parámetros más relevantes encontramos: probabilidad de bloqueo por servicio, throughput medio por usuario, erlangs ofrecidos por la celda, disponibilidad de recursos de radio y hardware, etc.

Normalmente, la capacidad se define como la máxima cantidad de tráfico (en términos de bits) o servicios (en términos de sesiones simultáneas) que la celda puede soportar. Para poder determinar esto, es necesario definir un modelo que contemple un sistema que contenga la celda y una mezcla de servicios, y a partir de allí pueda determinarse valores de probabilidad de bloqueo, throughput y otros.

El modelo que se tomó como referencia, es un modelo descrito en ***UMTS BTS dimensioning: model*** ([1]). Esta documentación fue cedida a AN-TEL por su proveedor de nodos 3G, Nortel.

5.2. Modelo tomado como referencia

El modelo tomado como referencia, realiza el dimensionamiento de una celda por dos caminos en paralelo. Por un lado enfocándose en el uso de los recursos de radio (análisis por potencia) separando el UpLink (UL) del DownLink (DL), y por otro tomando en cuenta las restricciones de hardware, más concretamente la capacidad de elementos de procesamiento en banda base: *Channel elements* (CE).

A continuación se explica el planteo propuesto en [1], ampliando los conceptos que este emplea y haciendo énfasis en los conceptos que van a ser usados en el modelo final de la celda 3G. En la sección siguiente mencionaremos los cambios y/o adaptaciones realizadas sobre el modelo referencia, y el por qué de las mismas, además de los conceptos nuevos empleados.

5.2.1. Dimensionado del Uplink

La mayoría de las técnicas de análisis y modelado de una red 3G y en particular la recomendada en [1], se basan en la conocida fórmula *Npole*. Esta fórmula modela la relación señal-interferente experimentada por los usuarios de un mismo servicio en una misma celda, y cómo se relaciona ese nivel de interferencia con la potencia de transmisión necesaria para cada UE.

Npole primera aproximación

En la versión más simplificada, se parte de las siguientes hipótesis de trabajo.

- La potencia de todos los móviles es exactamente la misma (a la potencia recibida en la estación base proveniente de cada móvil la llamaremos P).
- Hay un control de potencia perfecto.
- Hay una cantidad N fija de usuarios en la celda y estos están constantemente transmitiendo.
- No hay interferencia de otras celdas.

- No hay handover (no hay soft handover ni hard handover).
- No hay limitación de potencia en los móviles.
- Hay sólo un servicio por celda.

Estableceremos la siguiente notación de aquí en más.

- N_0 es la densidad espectral de potencia de ruido térmico.
- W es el ancho de banda sobre el que se transmite¹⁹.
- R es la tasa de transmisión de datos.
- E_b es la energía que se le entrega a cada bit.
- I_0 es la densidad total de ruido interferente (térmico más interferencia de otros móviles).

Entonces, la interferencia total que recibe un usuario en la estación base está dada por:

$$I = P(N - 1) + N_0W = I_0W$$

Por otro lado, la potencia del móvil es $P = E_bR$, y si combinamos esta ecuación con la anterior, obtenemos:

$$\frac{E_b}{I_0} = \frac{1}{(N - 1)\frac{R}{W} + \frac{N_0}{E_b}}$$

Dado un servicio, si la relación $\frac{E_b}{I_0}$ cae por debajo de cierto valor $(\frac{E_b}{I_0})_{min}$ no se podrá ofrecer este servicio con la calidad adecuada, entonces si despejamos de la ecuación anterior y tomamos el valor límite de calidad, se tiene:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{\left(\frac{E_b}{I_0}\right)_{min} - (N - 1)\frac{R}{W}}$$

Como se puede observar, esta ecuación tiene un polo (*pole equation*) este se da cuando la energía de bit es infinita. En esas condiciones obtenemos el máximo teórico de usuarios simultáneos N_{POLE} . Este valor se interpreta como la cantidad de usuarios de un servicio que, estando a distancia cero de

¹⁹3.84Mhz

la radio base, suponen una potencia de transmisión infinita de cada UE para poder alcanzar el mínimo de relación señal-interferencia requerido.

$$N_{max} = N_{POLE} = 1 + \frac{\frac{W}{R}}{\left(\frac{E_b}{I_0}\right)_{min}}$$

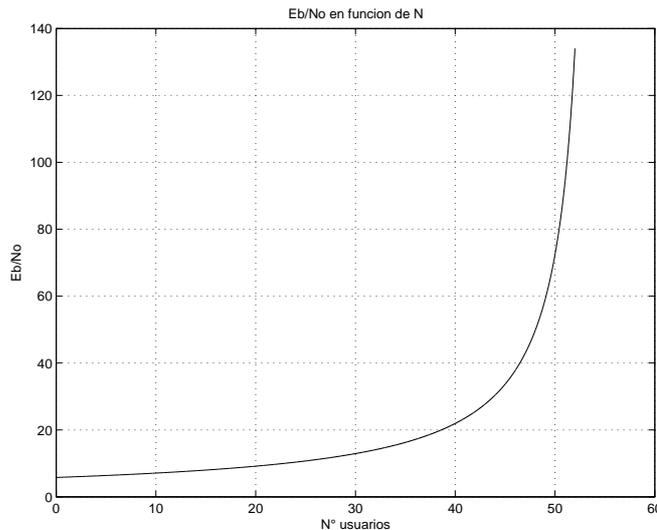


Figura 3: $W = 3,84Mbps$, $R = 12,2kbps$, $\left(\frac{E_b}{I_0}\right)_{MIN} = 5,9db$

Npole levantando algunas hipótesis

- **El usuario no transmite continuamente.**

El primer supuesto a eliminar es la transmisión continua de cada usuario. En realidad el usuario transmite parte del tiempo y durante el tiempo restante el canal de subida no envía potencia por lo que no contribuye con interferencia. Al cociente entre el tiempo en que está realmente transmitiendo (T_{on}) y el tiempo total ($T_{on} + T_{off}$) lo llamaremos σ . Aquí se asume *ergodicidad* en el proceso que rige la actividad de los usuarios. Es decir, asumimos que todos los usuarios tienen el mismo factor de actividad σ y además que este factor de actividad es equivalente a considerar que de los $N - 1$ usuarios que están presentes en la celda, en realidad sólo transmiten simultáneamente $\sigma(N - 1)$ de ellos en un instante dado cualquiera.

■ No todos los usuarios de la celda están controlados por la BTS

Por otra parte hasta ahora N es el número total de usuarios conectados simultáneamente que son controlados (en potencia) por la BTS de la celda en cuestión. Sin embargo, además de los anteriores, hay usuarios no controlados por esta BTS pero que igual interfieren porque agregan potencia de ruido a la celda. Para estimar la interferencia de los usuarios no controlados por la BTS, se separa en tres tipos:

- Usuarios que están en la celda en cuestión, en soft handover con una celda vecina, y están controlados en potencia por una celda vecina.
- Usuarios en una celda vecina que están en soft handover con la celda en cuestión, pero que son controlados por una celda vecina.
- Usuarios en soft handover entre otras dos celdas vecinas, pero que igual interfieren agregando potencia de ruido que llega a la radio base en cuestión.

Esta interferencia se pueden calcular asumiendo un patrón de celdas hexagonales, distribución uniforme de usuarios, y que en todas ellas hay N usuarios conectados simultáneamente. El problema está desarrollado en [8], dando un conjunto de integrales que se pueden calcular numéricamente en las hipótesis antedichas y se terminan expresando como un factor de interferencia f de la cantidad de usuarios por celda N de modo que la potencia total de interferencia es $P(N - 1)(1 + f)$.

■ Ganancia por diversidad de soft handover.

En el uplink el soft handover tiene dos impactos:

- Site Diversity. Esto ya fue considerado, en el factor f mencionado antes. Este factor está relacionado con lo que Nortel llama eficiencia del reuso de la frecuencia.
- Selection Diversity. Cuando un UE envía una trama, en el RNC se obtiene una trama proveniente de cada BTS con la que el UE se encuentra en soft handover. De este conjunto de tramas se utiliza aquella con menor número de errores. Esto implica otro impacto diferente al anterior y es una cierta “ganancia” por soft handover.

Esta última ganancia (G_{SH}) es equivalente a decir que el umbral de E_b/I_0 requerido es menor, porque puedo usar en algún caso otras tramas de otras BTSs.

Luego de levantadas estas hipótesis, llegamos a la fórmula planteada por Nortel de N_{POLE} mostrada a continuación:

$$N_{POLE} = 1 + \frac{\frac{W}{R}}{G_{SH}(1+f)\sigma\left(\frac{E_b}{I_0}\right)_{min}} \quad (1)$$

Capacidad en el UPLINK

Con esta fórmula de N_{POLE} (para un servicio) en [1] se plantea que la cantidad de usuarios simultáneos de un mismo servicio que puede haber en la celda, está dada por:

$$N_i = N_{pole,i} Uload_i$$

siendo $Uload_i$ un porcentaje de carga del servicio i en la celda. Este porcentaje es tal, que permite trabajar lejos de $N_{pole,i}$.

El por qué de esto, lo explicamos a continuación. Para llegar a N_{POLE} usuarios simultáneos hay dos limitantes:

- La limitación de potencia del móvil.
- Al operar en la zona de alta pendiente (ver 3), la inclusión de un usuario más implica un aumento general de potencia muy grande, generando inestabilidad en el sistema.

Teniendo en cuenta lo anterior, está claro que la cantidad máxima de usuarios N_{max} permitidos en la celda deberá ser menor que la cota introducida por N_{POLE} . Por otro lado, cuanto mayor sea la cantidad de usuarios admitidos en la celda, mejor será el aprovechamiento de la misma. Entonces surge la necesidad de contar con algún criterio que permita fijar N_{max} . Las primeras ideas para dar con algún criterio práctico, surgen al estudiar el comportamiento cualitativo de la curva determinada por la función N_{pole} , en donde se puede apreciar cómo varía la pendiente de la potencia, en función de la cantidad de usuarios admitidos en la celda. Si se analiza esta función, puede verse que la pendiente es aceptable, en general, considerando N_{max} menor que el 75 % del valor de N_{POLE} . En [1] se recomienda tomar $N_{max_i} = Uload_i N_{POLE}$ donde $Uload_i$ es el factor de carga considerado para el servicio i en el UL.

Nortel pasa a definir la cantidad total de usuarios de una mezcla de servicios de la siguiente manera:

$$N_{TOT} = \frac{ULoad_{TOT}}{\sum_i \frac{\alpha_i}{N_{pole,i}}}$$

donde α_i es la proporción de usuarios del servicios i en una mezcla de servicios en la *busy hour* (BH) y $ULoad_{TOT} = \sum_i ULoad_i$, siendo $ULoad_i$ el factor de carga en el UL del servicio i .

Por último define el throughput de la celda con la siguiente ecuación:

$$ULCellTh_{BH} = \sum_i N_i \cdot ULRlcDataRate_i$$

donde $ULRlcDataRate$ es el data rate del servicio en la capa RLC²⁰ (12kbps, 64kbps, etc.). Este enfoque concluye brindando la siguiente expresión para la cantidad de usuarios en la hora pico que la celda puede servir:

$$N_{inBH} = \frac{ULCellTh_{BH}}{\sum_i RateinBH_i}$$

En donde $RateinBH_i$ es el rate de un usuario del servicio i en la BH. Observemos que el pasaje que realiza Nortel del análisis para un único servicio basado en N_{pole} , a una mezcla de varios servicios, se realiza teniendo en cuenta las proporciones de los mismos en la mezcla, y un factor de carga total del UL ($ULoad_{TOT}$) que se sugiere tomar, sin más fundamentos, en 50%. Es decir que se abandona la línea de modelado según N_{pole} al pasar a considerar varios servicios.

Adelantemos aquí que el enfoque dado al modelo ajustado en este proyecto, si bien se basa en lo anterior, difiere de lo planteado en [1] ya que se tienen allí una serie de factores que se desconocen, y para los cuales no se brinda un criterio justificado para determinarlos (por ejemplo los $ULoad_i$ de cada servicio, y el $ULoad_{TOT}$).

Influencia en el UL de HSDPA.

Al agregar HSDPA, se agregan los siguientes canales:

²⁰Radio Link Control.

- HS-DSCH: *High-Speed Downlink Shared Channel*. Canal compartido de bajada de datos. Implica un canal físico más en el DL.
- HS-SCCH: *High-Speed Shared Control Channel*. Canal de bajada para control (scheduling, etc.).
- HS-DPCCH: *High-Speed Dedicated Physical Control Channel*. Control dedicado en el UL.

Esto hace que suba el piso de interferencia de la celda.

Entonces $(Eb/I_0)_{min}$ debe ser mayor para conservar la calidad en recepción. Nortel estima el impacto de tener HSDPA en la celda, sobre los valores de $(Eb/I_0)_{min}$ anteriores, y provee un factor de ajuste para $(Eb/I_0)_{min}$ en presencia de HSDPA a los que llama *Loss SIR*:

Pérdida en db de Eb/No para diferentes servicios en el UpLink

CS-12.2	CS-64	PS-64	PS-128	PS-384
1.5	1.5	1.0	1.0	0.5

Al tener en cuenta este valor, Nortel esta modelando la influencia de HSDPA en el UL.

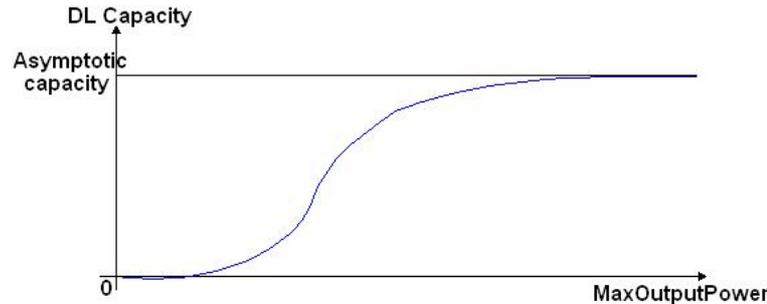
5.2.2. Dimensionado del DownLink

Para poder calcular el throughput de la celda en el DownLink (DL), Nortel separa el análisis en R99 y HSDPA, obteniendo para cada caso, una curva que determina la cantidad de usuarios en la BH (N_{inBH}) en función de la potencia asignada a HSDPA. El resultado final sale de imponer el cumplimiento de las restricciones impuestas por R99 y HSDPA. A continuación se explica lo anterior.

Análisis R99

Para analizar la capacidad de la celda con R99 en el DL, Nortel plantea una relación entre el número de usuarios servidos, y la potencia de trans-

misión de la radio base. Si bien no da una expresión para determinar este comportamiento, ilustra con una curva que mostramos a continuación, el comportamiento cualitativo del sistema visto en el DL. A partir de esta curva,



se plantea que hay un máximo de capacidad teórica al que llama “Asymptotic capacity”, el cual corresponde al número máximo de usuarios que pueden ser servidos en la celda, asumiendo que la estación base (BS) puede ofrecer potencia infinita a todos los usuarios. A continuación se amplían estos conceptos.

Capacidad asintótica y factor de carga en el DL

Nortel define esta capacidad, en términos de usuarios simultáneos de un servicio i , de la siguiente manera.

$$N_{asympt,i} = \frac{\alpha + Nmax_i}{\sigma F}, \quad \text{donde } Nmax_i = \left(\frac{1}{C/I} \right)_{target} = 10^{-\left(\frac{Eb}{No}\right)_i + 1db + PG_i}$$

De donde:

- $F = f + \alpha$
- f , σ , definidos anteriormente.
- α , también hay que tener en cuenta que por más que los códigos en la estación base sean perfectamente ortogonales, debido al efecto del multi-camino, y otros efectos de la propagación llegan con un cierto grado de no ortogonalidad al móvil, lo que agrega interferencia.
- PG_i , ganancia de procesamiento del servicio i ($\frac{W}{Rate_i}$).

No se hará más hincapié en esta fórmula ya que para el modelo final se considera un enfoque un poco diferente de este límite teórico.

Evidentemente el Nodo B no tiene potencia infinita, por lo que el número de usuarios no podrá ser N_{asympt} sino menor. Nortel define el siguiente factor de carga,

$$DL_{Load} = \frac{MaxTxPower - P_{ccc}}{MaxTxPower + N_o N_f W \frac{PL_{mean}}{F}} \quad (2)$$

con $MaxTxPower$ potencia máxima de transmisión, P_{ccc} potencia de los canales comunes de control, $N_o N_f W$ el ruido térmico escalado al ancho de banda y el ruido del móvil. PL_{mean} es la media de las pérdidas por atenuación en el camino del DL.

Capacidad de R99 en presencia de HSDPA

Si HSDPA está habilitado para el cálculo del factor de carga en la ecuación (2), en el numerador hay que restar además de P_{ccc} , la potencia asignada para HSDPA P_{HSDPA} . Nortel denomina $DL_{LoadR99}$ a este factor de carga.

Por tanto, si se analiza el número de usuarios R99 admisibles en el DL, en función de la potencia asignada a HSDPA, el mismo disminuye al aumentar ésta última.

De esta manera el dimensionamiento de la cantidad de usuarios R99 en la BH se realiza de manera análoga a lo expuesto en 5.2.1. La siguiente expresión determina la capacidad en términos de usuarios en la hora pico y throughput de la celda para el DL:

$$N_{inBH}(R99) = \frac{CellTh_{BH}(R99)}{\sum_i Rate_{inBH}(R99)_i} = \frac{DL_{LoadR99}}{\sum_i \frac{\alpha_i}{N_{asympt,i}}}$$

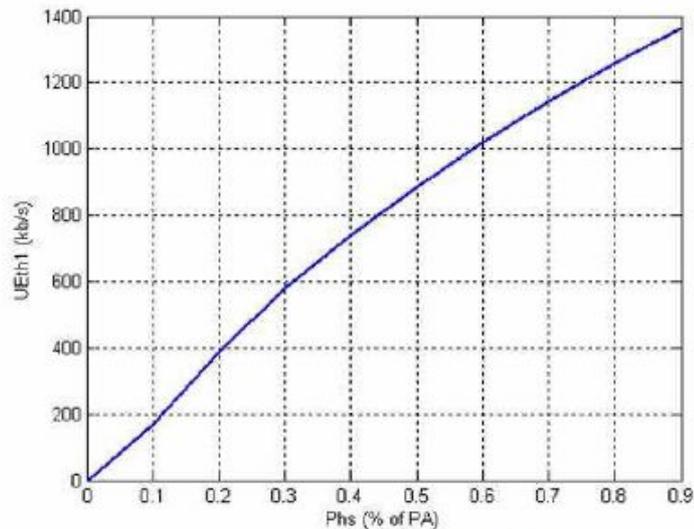
Siendo el $Rate_{inBH}(R99)_i$, el rate efectivo del servicio i tomado en la BH²¹.

²¹Corresponde a la totalidad de los bits transmitidos en la BH, dividido 3600seg.

Dimensionado HSDPA

En HSDPA, Nortel define tres tipos de throughput para caracterizar la performance de la celda. Si bien el modelo final tendrá diferencias apreciables respecto a lo planteado en [1], los conceptos introducidos por Nortel serán utilizados. Por tal motivo, se explican aquí estas ideas con cierta profundidad.

1. Se define el “single user throughput” ($UEth1$) como el throughput de un único usuario HSDPA en la celda, durante los períodos “on” (en los que tiene el canal) promediado sobre toda la celda²². Observemos aquí, que esta cantidad varía particularmente con la potencia asignada para HSDPA. Tal variación puede observarse en el siguiente gráfico extraído de [1].



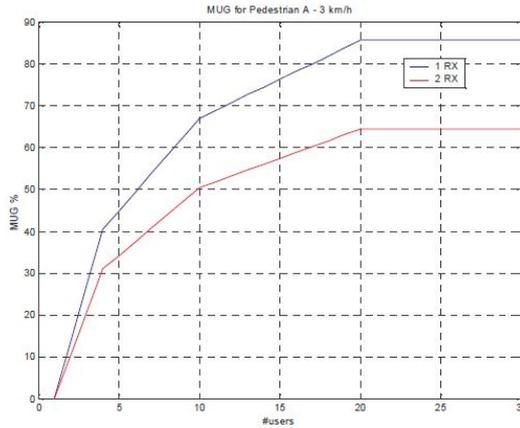
Single user throughput versus HSDPA power

2. El throughput de la celda es la suma del throughput (durante los períodos “on”) de todos los usuarios HSDPA servidos simultáneamente por el *scheduler* en el Nodo B. De esta manera, $CellTh(HS, n)$ será el throughput de la celda en HSDPA cuando hallan n usuarios. Al despachar juntos n usuarios el throughput de la celda es:

$$CellTh(HS, n) = UETH1 \cdot MUG(n) \geq CellTh(HS, 1) = UETH1$$

²²Es decir que se coloca al UE a diferentes distancias de la radio base, se calcula su throughput, y se promedia el resultado entre todas las distancias consideradas

siendo $MUG(n)$ la ganancia multi-usuario (ganancia por multiplexado). La siguiente figura brinda una idea cualitativa de la variación del MUG a medida que más usuarios comparten el canal.



Multi-Users Gain versus the number of users scheduled simultaneously

Figura 4: Imagen extraída de [1]

- Se define también $UEth(HS, n)$, como el throughput promedio que experimenta un usuario durante los períodos ON, en la presencia de otros $n - 1$ usuarios HSDPA en la celda. Es igual al throughput de la celda dividido entre los n usuarios que se despachan simultáneamente:

$$UEth(HS, n) = UEth1.MUG(n)/n$$

Continuando con el desarrollo de Nortel, se considera la probabilidad de tener n usuarios simultáneamente en la celda, dada por la siguiente expresión:

$$p(n) = \frac{ErlTot^n}{n!} e^{-ErlTot}$$

Siendo $ErlTot = NinBH(HS).ErlUser$, donde $NinBH(HS)$ es el número de usuarios HSDPA en la “busy hour” y el $ErlUser$, es el cociente entre throughput de usuario durante la BH y el throughput de usuario durante los períodos ON²³. La expresión anterior surge de considerar una cola tipo $M/M/\infty$, donde los tiempos entre arribos y tiempos de permanencia en la misma se modelan con distribuciones exponenciales de parámetro λ y μ respectivamente, y $ErlTot = \frac{\lambda}{\mu}$.

²³ $ErlUser$ es igual al factor de actividad definido como $\frac{T_{ON}}{T_{ON}+T_{OFF}}$

Nota: Si bien Nortel supone una cola $M/M/\infty$, la capacidad del *scheduler* en el Nodo B es finita por lo que una mejora a lo anterior sería considerar una cola $M/M/c$, donde c es la cantidad máxima de usuarios despachados simultáneamente en la celda.

De aquí, se obtiene el throughput de la celda durante la BH como

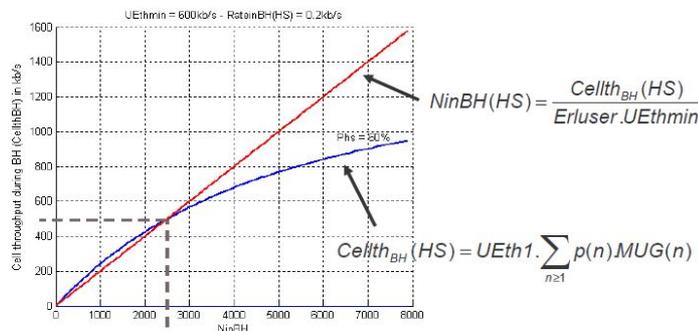
$$CellTh_{BH} = U Eth1 \sum_{n>1} p(n)MUG(n) \quad (3)$$

que refiere a la esperanza de MUG multiplicado por el *single user throughput*.

Por otro lado, se plantea el throughput mínimo que se quiere garantizar a cada usuario $UEthmin$ que se relaciona de la siguiente manera con los parámetros ya definidos.

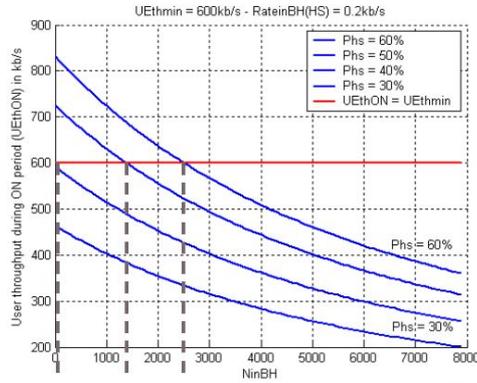
$$CellTh_{BH}(HS) = NinBH(HS) \cdot ErlUser \cdot UEthmin \quad (4)$$

Ahora, dada una potencia asignada a HSDPA, como el throughput de la celda es único, el valor de $NinBH$ resultante del dimensionamiento deberá verificar 3 y 4 a la vez. La solución, como se ve en la figura siguiente, se obtiene del corte de ambas curvas. Es posible también ver las curvas



HSDPA cell throughput during BH versus the number of HSDPA users in BH

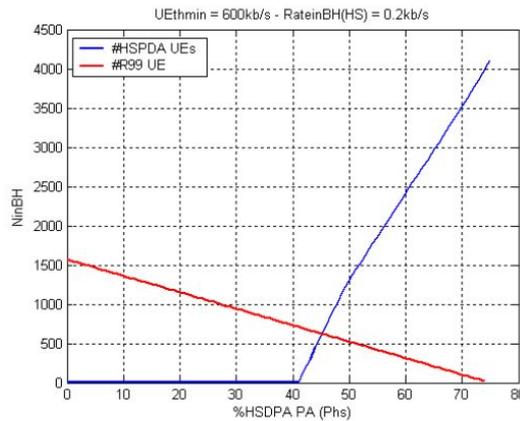
anteriores, graficando el throughput por usuario en los períodos ON ($UEthON$) contra el número de usuarios en la BH y cortando con el mínimo $UEthON = UEthmin$ deseado. En la gráfica siguiente se presentan estas curvas para diferentes valores de potencia asignada a HSDPA. Observar que para valores bajos de potencia no hay solución posible, lo que implica la imposibilidad de la celda de ofrecer si quiera un mínimo tráfico HSDPA que garantice a los usuarios $UEthmin$, debido a la insuficiente potencia asignada a HSDPA.



HSDPA user throughput during ON period versus the number of HSDPA users in BH for different HSDPA power

Capacidad global en el DL con HSDPA y R99 conjuntamente

Del análisis realizado para HSDPA y R99 se desprende el número de usuarios en la BH en función de la potencia asignada a HSDPA. El punto óptimo se



Number of R99 users in BH and number of HSDPA users in BH versus the percentage of PA power allocated to HSDPA

obtiene al tomar el máximo sobre la curva que resulta de considerar el mínimo de ambas curvas: $NinBH = \max(\min(NinBH(R99), NinBH(HS)))$.

5.2.3. Dimensionado por hardware

Para calcular la capacidad en Banda Base (CEM) de la celda trabajando en R99, Nortel propone en su documento el análisis mostrado a continuación. Debido a que el modelo final ajustado, difiere bastante del enfoque dado por Nortel para el dimensionamiento de CE's, no se explicará detalladamente el mismo. Puede ampliarse al respecto consultando la referencia [1].

El bloqueo por servicio debido a los CE viene dado por una simplificación del modelo de Erlang para multi-servicios:

$$B_i = \frac{p_i}{\delta} \cdot E\left(\frac{a}{\delta}, \frac{c}{\delta}\right)$$

De donde:

- . B_i es la probabilidad de bloqueo del servicio i .
- . $a = \sum_i e_i \cdot a_i$, en donde $a_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$.
- . $\delta = \frac{\sum_i e_i^2 \cdot a_i}{a}$.
- . $E\left(\frac{a}{\delta}, \frac{c}{\delta}\right)$ es la formula de Erlang B.
- . p_i es el costo máximo de CE, e_i es el costo efectivo (suponemos aquí $e_i = p_i$).
- . c es la cantidad total de recursos disponibles (en nuestro caso tenemos 128 CE dedicados por celda para R99 y 64 CE dedicados a HSDPA en la fase inicial de la red 3G).
- . λ_i es la tasa de arribos del servicio i y $\frac{1}{\mu_i}$ la duración promedio de la sesión.

Entonces, teniendo λ , μ y el costo en CE de cada servicio, el problema se resuelve aplicando la ecuación anterior para cada servicio y obteniendo así las probabilidades de bloqueo.

5.2.4. Dimensionado final de Nortel

El dimensionamiento final de la radio base, como se mencionó inicialmente, se obtiene de las siguientes expresiones:

Base Station UL Capacity:

$$BS_UL_{CAP}(kbps) = \text{mín}(ULradio_{CAP}, CEM_{CAP})$$

Base Station DL Capacity:

$$BS_DL_{CAP}(kbps) = \text{mín}(DLradio_{CAP}, CEM_{CAP}, Carrier_{CAP})$$

- $ULradio_{CAP}$ es la capacidad de la estación base dada por los recursos de radio en el UL (análisis por potencia planteado anteriormente). $DLradio_{CAP}$, es lo mismo que lo anterior pero en el DL.
- CEM_{CAP} , es la capacidad de la estación base debido a las restricciones de hardware (CE's). Si bien esta fórmula no se explicó en este documento, está explicada en [1].
- *Carrier Capacity:* $Carrier_{CAP}$, es la capacidad teórica tomando en cuenta los códigos disponibles. Sobre este análisis no se menciona nada en [1].

5.3. Qué elementos no contempla y modificaciones del mismo

Hasta aquí se ha presentado el modelo propuesto por Nortel en [1], y que sirvió de referencia para arribar al modelo final utilizado en este proyecto. A continuación se señalan algunos aspectos poco convincentes del modelo de Nortel, así como algunas modificaciones al mismo a los efectos de cubrir las necesidades de la herramienta de dimensionamiento requerida.

El primer gran déficit del modelo de Nortel, es que simplifica mucho la realidad basándose en mediciones y promediados. Si bien esto posee la ventaja de la sencillez del modelo obtenido, así como el bajo costo computacional necesario para arribar a los resultados, los mismos tendrán un alcance limitado y su precisión dependerá fuertemente de parámetros estadísticos obtenidos a través de mediciones en redes ya desplegadas. Sin embargo se pretende contar con un modelo que refleje mejor la realidad, sobre todo la ocupación del sistema (modelo probabilístico) teniendo en cuenta las diferentes limitantes de esta tecnología (potencia, códigos, etc.). Además es deseable que los parámetros de entrada al modelo sean de fácil obtención, como por ejemplo tasas de

arribos de servicios que puedan estimarse de otras redes ya existentes como por ejemplo la red GSM.

A continuación, listamos varios puntos que deseamos que el modelo ajustado pueda corregir.

- . En el UpLink, Nortel no generaliza N_{pole} para más de un servicio R99. El pasaje a una mezcla de varios servicios se hace a través de promediados, agregando una buena cantidad de parámetros del tipo “factor de carga” para los cuales no está claro cómo dimensionarlos. Entre otros aspectos negativos, se pierde buena parte del *realismo* del modelo basado en potencia (N_{pole}) al considerar una mezcla de muchos servicios.
- . En el DL, para calcular la cantidad máxima de usuarios de un servicio, parte del N_{asympt} antes mencionado. Esto no es lo mismo que el N_{pole} , ni tampoco deja claro cómo lo obtiene, sin embargo, en [7] y otras referencias se ha encontrado un enfoque basado en N_{pole} para el DL. Por esta razón se decidió tomar el N_{pole} DL para el modelo final, y generalizarlo de manera análoga al UL para varios servicios.
- . Tanto en el UL como en el DL, Nortel obtiene la cantidad máxima de usuarios utilizando el valor α_i que representa la proporción de usuarios del servicio i sobre el total, pero que es difícil de conocer con precisión a priori.
- . Otro aspecto negativo del modelo propuesto en [1], es que para HSDPA se define un $ErlUser$ (actividad de un usuario HSDPA) que no toma en cuenta el throughput que tiene cada usuario dependiendo de los que haya conectados. Sin embargo como se explicó en la introducción, el throughput que se puede ofrecer a un usuario HSDPA depende de la cantidad de usuarios compartiendo el canal (además de la potencia asignada a HSDPA, códigos, etc.). Por otro lado, calcula N_{inBH} sin contemplar los diferentes comportamientos que pueden tener los usuarios HSDPA. Dicho de otra manera, no es lo mismo usuarios que descarguen unas pocas páginas web, que usuarios haciendo FTP o peer2peer, ya que la forma en que estos usuarios ocupan los recursos es diferente, y por ende también difieren en el impacto sobre la

performance de la celda. Una posible solución a lo anterior, es considerar diferentes tipos de usuarios HSDPA y trabajar con un modelo de probabilidades que contemple esto.

- . El documento referencia de Nortel, hace mención de la limitación por códigos pero no propone nada respecto a su dimensionamiento. Este punto era de interés para el cliente por lo cual lo incluimos en la herramienta.

5.4. Fundamentos del modelo utilizado

A continuación se explica y desarrolla el modelo final. Como se adelantó, el modelo toma muchas de las ideas de [1], y en muchos casos se las modifica y adapta a las necesidades del proyecto. Otras veces el modelo se nutre de las ideas surgidas de la interacción con nuestro tutor, así como con otros integrantes del convenio.

Básicamente, lo que se pretende es obtener la distribución de probabilidad en estado estacionario, de los diferentes estados posibles en que puede estar la celda cuando la misma ofrece una mezcla dada de servicios, y a partir de allí obtener parámetros útiles para el dimensionamiento tales como usuarios máximos, probabilidades de bloqueo, etc.

La idea, es trabajar con una mezcla de k servicios. Se optó por modelar un servicio, como un RAB de subida y otro de bajada, con anchos de banda determinados, y factores de actividad de utilización de los mismos tanto en UL como en el DL²⁴. Se entiende por *tasa de arribo del servicio X* (λ_x), a la frecuencia con que la celda recibe la solicitud de establecimiento de un servicio del tipo X. El establecimiento de dicho servicio implicará entonces reservar recurso de radio y hardware, si es que alcanzan, para la generación de los RAB's que el servicio requiere. De no haber recursos suficientes, el sistema impedirá el establecimiento del servicio y diremos que el mismo fue bloqueado. Por otro lado se define el *tiempo medio de duración del servicio X* o *tiempo medio de permanencia* ($\frac{1}{\mu_x}$), como el tiempo promedio (en segundos) que un usuario mantiene el servicio X establecido (lo use o no, los recursos de radio de ese servicios estarán reservados durante todo el tiempo de permanencia para el usuario que solicitó el servicio X). Conociendo entonces λ_x y μ_x para los k servicios de la celda, queda determinada una cadena

²⁴Las hipótesis del uso de factores de actividad pueden verse en 5.2.1

de Markov en tiempo continuo²⁵ de dimensión k , donde el espacio de estados de la cadena es el conjunto de vectores (N_1, N_2, \dots, N_k) que indica en cada instante cuál es la cantidad de usuarios de cada servicio en el sistema. La figura 5 muestra parte de una cadena de Markov para dos servicios: voz y datos con tasa de arribos λ^v y λ^d , y tiempos de permanencia medios $\frac{1}{\mu^v}$ y $\frac{1}{\mu^d}$ respectivamente.

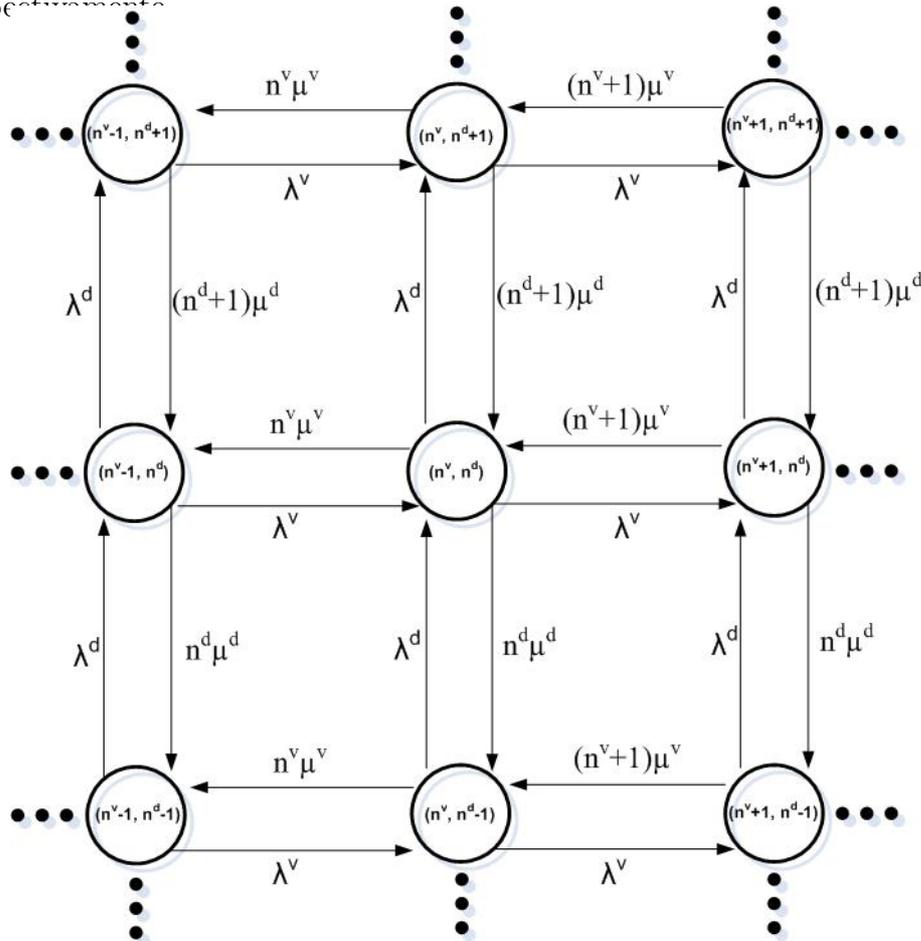


Figura 5: Cadena de Markov en dos dimensiones.

La principal dificultad a la hora de determinar una cadena de Markov que modele correctamente la realidad de nuestro sistema, es modelar el control de acceso que la celda aplica a las solicitudes de servicio por parte de los UE. Dicho control de acceso se basa en la disponibilidad de recursos, y determina cuáles son los estados posibles de la celda y por ende los estados posibles de la cadena. Al proceso de determinación de los límites de la cadena lo

²⁵En el Anexo B se realiza un breve repaso de los conceptos de cadenas de Markov utilizados en esta sección

llamaremos *corte de la cadena*. Un estado (N_1, N_2, \dots, N_k) pertenecerá al límite de la cadena si alcanzan los recursos para servir a los N_1 usuarios del servicio 1, los N_2 del servicio 2, etc., pero para al menos uno de los servicios, no es posible agregar un usuario más (es decir que el agente encargado del control de acceso a la celda, bloquea el ingreso de un usuario más, por el motivo que fuere).

En la realidad el control de acceso es lo suficientemente complejo como para que sea prudente modelarlo por partes. Es decir, el sistema real considera entre otras cosas, la disponibilidad de recursos tales como:

- . El nivel de interferencia presente en la celda (o de manera equivalente, la potencia de transmisión necesaria para cada UE, para que su comunicación sea posible).
- . La cantidad de códigos OVVSF disponibles en el DL.
- . La cantidad de elementos de hardware de procesamiento en banda base libres en el Nodo B (CE's).

Realizar un modelo que integre simultáneamente los tres recursos mencionados a la hora de determinar el corte de la cadena, no sólo agregaría una complejidad indeseable, pero más importante aun, no representaría una ventaja a la hora de analizar qué recurso es el que limita la capacidad de la celda en estudio, dada una configuración particular de la misma y una mezcla de servicios definida con una demanda particular para cada servicio. Dado entonces que hemos elegido distinguir entre las tres limitaciones antes mencionadas, explicaremos cómo hemos resuelto el corte de la cadena para cada una de ellas, separando la explicación de la siguiente manera:

- . Región en potencia (UL y DL), con y sin HSDPA: Aquí se determina la región de estados válidos según la restricción en potencia de transmisión de la celda y los móviles 3G.
- . Región por códigos (DL): Se determina el corte de la cadena en función de la cantidad de códigos OVVSF utilizados en cada estado de la celda. Se conoce de antemano que la cantidad de códigos en el UL no representa una limitante, por lo cual no se tiene en cuenta.
- . Región por limitaciones de hardware: Dependiendo de la cantidad de CE's que tenga el Nodo B en cuestión, y de la mezcla de servicios

definida para la celda, se determina el corte de la cadena tomando como límite aquellos estados que utilizan la totalidad de los CE's disponibles.

Cabe destacar, que a diferencia de Nortel, en el análisis por potencia se juntará UL y DL, creando una matriz que contemple las limitaciones en los dos sentidos. A continuación se explican los tres criterios por separado.

5.4.1. Región por potencia: R99

Npole para el DL

Las ideas de este Npole, son exactamente las mismas que en el caso del UpLink (ver 5.2.1). A la expresión que se llega es la siguiente (idem a Npole UL, versión simple):

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{\left(\frac{E_b}{I_0}\right)_{min} - (N-1)\frac{R}{W}}$$

Esta ecuación tiene un polo, y si tomamos en cuenta los siguientes parámetros listados a continuación llegamos a (5):

- El factor de actividad σ .
- La interferencia de otras celdas f .
- Ganancia por soft handover G_{SH} .
- También hay que tener en cuenta que por más que los códigos en la estación base sean perfectamente ortogonales, debido al efecto del multi-camino, y otros efectos de la propagación llegan con un cierto grado de no ortogonalidad al móvil, lo que agrega interferencia. Esto se modela con un factor α .

$$N_{max} = 1 + \frac{\frac{W}{R}}{G_{SH}(\alpha + f)\sigma \left(\frac{E_b}{I_0}\right)_{min}} \quad (5)$$

Generalización de Npole para más de un servicio

Aquí es donde el modelo realizado empieza a ser diferente del propuesto en [1]. La mayor diferencia viene dada por la generalización del modelo *Npole* para la dinámica de la potencia presente en el sistema para una mezcla de varios servicios.

Se supone que se tienen k servicios diferentes y cada servicio tiene N_i usuarios, con *rates* R_i y potencias $P_i = E_{bi}$ diferentes para cada tipo de servicio, con $i = 1, \dots, k$. La potencia total en la celda es:

$$N_0W + \sum_{j=1}^n N_j P_j = I_0W$$

La restricción para que la señal sea recibida por un usuario del servicio i es que $\frac{E_{bi}}{I_0} = \gamma_i$ esté por encima de cierto valor mínimo. Considerando el servicio i se tiene

$$\frac{N_0W}{E_{bi}} + \frac{1}{E_{bi}} \sum_{j=1}^k N_j E_{bj} = \frac{I_0W}{E_{bi}}$$

de donde, dividiendo entre W y multiplicando y dividiendo por I_0 el segundo término, se obtiene

$$\frac{N_0}{E_{bi}} = \frac{1}{\gamma_i} - \frac{1}{W} \sum_{j=1}^k N_j R_j \frac{\gamma_j}{\gamma_i}$$

Lo que obtuvimos, es una fórmula análoga al caso de un solo servicio:

$$\frac{E_{bi}}{N_0} = \frac{1}{\frac{1}{\gamma_i} - \frac{1}{W} \sum_{j=1}^k N_j R_j \frac{\gamma_j}{\gamma_i}} \quad (6)$$

Cabe señalar, que esta es la versión simplificada de la fórmula de N-pole para el caso de varios servicios, y en esta formulación no se incluyeron los parámetros mencionados antes para el caso de un único servicio, como son la ganancia por soft handover, actividad, etc. De todos modos la inclusión de estos parámetros se realiza de manera análoga a lo visto para el caso de un servicio.

Si se grafica $\frac{E_{bi}}{N_0}$ en función de (N_1, \dots, N_k) se obtiene para cada servicio una superficie donde $\frac{E_{bi}}{N_0}$ tiende a infinito si $\sum_{j=1}^k N_j R_j \frac{\gamma_j}{\gamma_i}$ tiende a $\frac{W}{\gamma_i}$. La

figura 6 se ilustra lo anterior. En ella se grafica $\frac{E_b}{N_0}$ para el servicio de *Video-llamada*, cuando comparte la celda con el servicio de *voz*. Obsérvese que la energía de bit requerida crece a medida que aumentan la cantidad de usuarios en la mezcla, y diverge para las combinaciones de usuarios de voz y video-llamada que se grafican bajo la superficie (también pueden apreciarse los picos en la superficie).

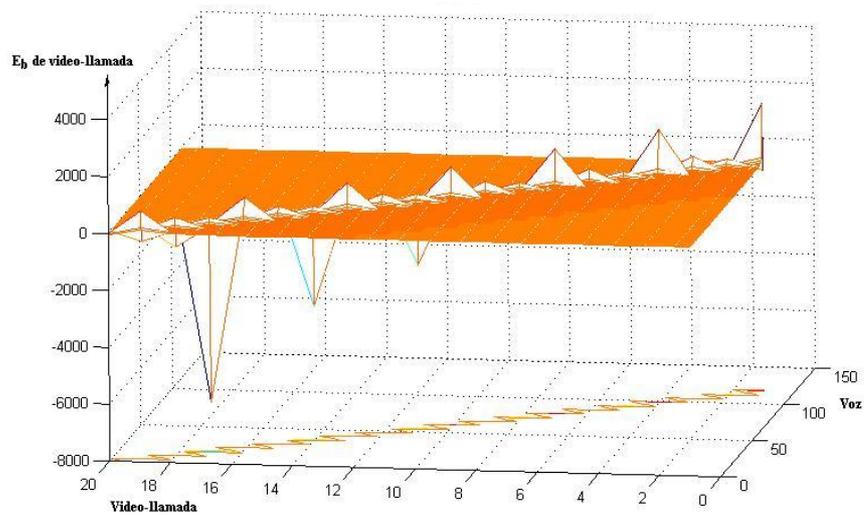


Figura 6: Superficie $\frac{E_b}{N_0}$ para una mezcla de *voz* y *video-llamada*.

5.4.2. Criterios para el corte de la cadena

Norma del gradiente de Npole

Como se ha visto, el modelo Npole generalizado a varios servicios implica que exista un conjunto de estados para los cuales la potencia de transmisión de los terminales debe ser infinita si se desea recepcionar la señal correctamente. Entonces, se pretende que la celda pueda llegar lo más cerca posible a la región de polos, pero manteniendo la estabilidad del sistema y la potencia de los terminales acotada. Un posible criterio es considerar el gradiente de la función (Npole) que determina la potencia de transmisión del servicio i-ésimo, en función de la cantidad de usuarios de cada servicio presentes en la celda. De esta manera es posible tomar la norma del mencionado gradiente como medida de la inestabilidad del sistema, ya que si la norma es suficientemente grande significa que cualquier usuario que se agregue al sistema, hará que el resto deba aumentar su potencia de transmisión a una cantidad superior a la potencia máxima de transmisión de los terminales, generando además inestabilidad. Es decir, si el punto de operación de la celda, es tal que si ingresa un usuario todos deben aumentar su potencia de transmisión de forma desmesurada, entonces se genera un efecto *ping-pong* debido a la partida y arribos de los usuarios en torno al punto de operación. Un punto de estas características, será tal que la norma del gradiente de la función Npole será *grande*.

Entonces el criterio anterior es una primera aproximación a la solución deseada, pero tiene algunos inconvenientes. El primero y más notorio, es que no está claro qué valor considerar para decir que la norma del gradiente es *grande*. Por otro lado, las características de la expresión Npole son tales que es posible que el gradiente sea *grande* debido a la influencia de uno solo de los servicios. En ese caso, se estaría limitando la entrada de usuarios de otros servicios que no contribuyen al crecimiento de la norma del gradiente, y por ende no inestabilizarían al sistema. La expresión del algoritmo para determinar si un estado es válido o no es la siguiente según la norma del gradiente es:

$$R_i(c) = \left\{ (N_1, \dots, N_k) : \left| \nabla \left(\frac{E_{bi}}{N_0} \right) \right| \leq c \right\}$$

con c la máxima norma del gradiente admitida.

Para elegir de forma adecuada esta norma, en un principio se propuso que la norma fuese menor a un valor c , dado por la proporción en la mezcla de los servicios que se quieran estudiar. Con este valor de c , la matriz de estados quedaba limitada como se muestra en la figura (7). En la misma figura estamos mostrando los polos (norma de gradiente infinito) en color negro sólido, y los estados límite (frontera) de la cadena según la norma del gradiente. Como se puede observar, hay lugares de la frontera en donde se

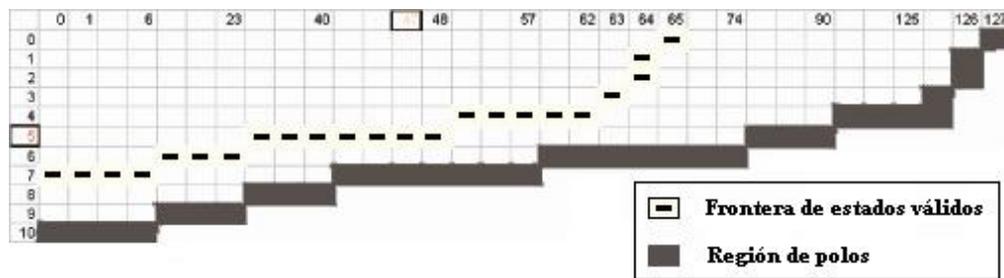


Figura 7: Frontera en 2 dimensiones de la matriz de estados

está muy cerca del polo. Este mismo fenómeno, muchas veces empeoraba para otras configuraciones de servicios, a tal punto de estar en un estado, muy cerca del polo (distancia = 1 usuario). Esto llevó a elegir otro criterio de corte por potencia, que se presenta a continuación.

Factor de carga

Para este segundo criterio, de manera similar a Nortel, se definió un factor de carga para el UpLink ($ULoad_{TOT}$) de la celda (parámetro de entrada al modelo), y se calculó el factor de carga del DownLink ($DLload_{TOT}$) con la expresión provista por Nortel. Por otro lado, los polos del sistema para una mezcla de servicios vienen dados por las siguientes ecuaciones:

$$UL: \quad W - G_{SH}(1 + f)\sigma \sum_{j=1}^k N_j R_j \gamma_j = 0 \quad (7)$$

$$DL: \quad W - G_{SH}(\alpha + f)\sigma \sum_{j=1}^k N_j R_j \gamma_j = 0 \quad (8)$$

Es necesario poder determinar si el estado (N_1, \dots, N_k) admite o no un usuario más del servicio j -ésimo. Suponiendo k servicios diferentes y cada servicio con N_i usuarios, con $i = 1, \dots, k$, entonces fijamos N_i para todo $i \neq j$. De esta manera tenemos una función N_{pole} para el servicio j , en la cual inciden la cantidad de usuarios de los servicios restantes. Esta función para el servicio j -ésimo es la siguiente:

$$N_j(poleUL) = \frac{W - G_{SH}(1 + f)\sigma \sum_{i \neq j}^k N_i R_i \gamma_i}{G_{SH}(1 + f)\sigma R_j \gamma_j}$$

Entonces denominaremos al estado (N_1, \dots, N_k) , válido en la dirección del servicio j si cumple las siguientes dos ecuaciones:

$$N_j < N_j(poleUL) * ULload_{TOT} \quad y \quad N_j < N_j(poleDL) * DLload_{TOT}$$

De esta forma diremos que un estado (N_1, \dots, N_k) es válido por potencia, si verifica lo anterior para todo N_i con $i = 1, \dots, k$. En la siguiente figura se ilustra lo anterior para una mezcla de dos servicios. El estado de coordenadas (N_i, N_j) , marcado con un signo de interrogación, es el estado que se quiere determinar si es o no un estado válido según el control de acceso a la celda (por potencia). Entonces, en las direcciones de ambos servicios se determina el valor dado por N_{pole} (estado negro en la figura) y se le aplica el factor de carga resultando en el estado marcado con un punto negro. Para decidir se compara la posición del estado a validar, con la de todos los estados marcados con un punto negro. Por ejemplo en el caso de la figura, ese estado sería válido y por lo tanto perteneciente a la matriz de estados.

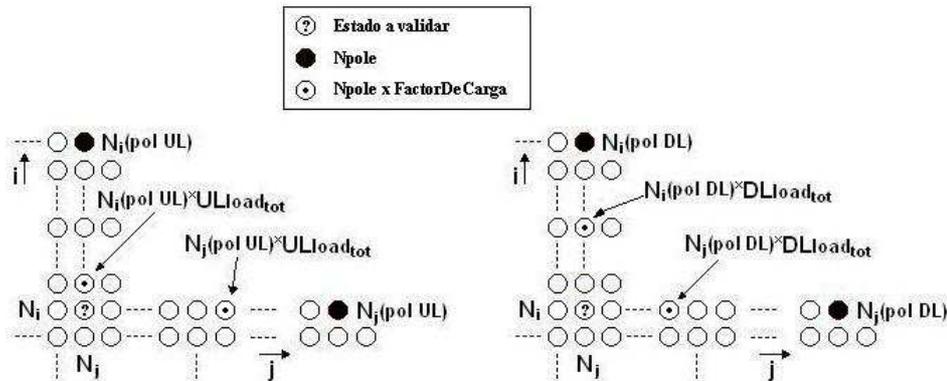


Figura 8: Modelo del Dominio

5.4.3. Región por potencia con HSDPA

Comencemos explicando el modelo realizado para un servicio HSDPA. La particularidad de un usuario HSDPA es que en el UL, a los efectos de la utilización de recursos de radio y códigos, es como un servicio R99 más, con un RAB de subida de un determinado ancho de banda (64kbps, 128kbps o 384kbps en los casos más usuales). Por otro lado en el DL los únicos efectos en los recursos de radio son la utilización de códigos OVFS de spreading factor 16 (usualmente 5) y el aumento en el piso de interferencia debido a la existencia de los canales de control de HSDPA en el UL, y el canal de datos compartido en el DL. Se puede decir de manera informal, que un servicio HSDPA es como *medio servicio R99*²⁶. Otra particularidad de los servicios de HSDPA es que el tiempo promedio de permanencia de un usuario, varía con la cantidad total de usuarios HSDPA, así como con la potencia y códigos OVFS asignados (ya que esto incide en el throughput promedio por usuario).

Ahora, los dos puntos a estudiar en HSDPA son: cómo se incluye el servicio HSDPA en la región antes mencionada cuando el mismo pertenece a la mezcla de servicios; y por otro lado, cómo se calcula el throughput de la celda y el throughput promedio de un usuario cuando consideramos este servicio. En esta sección, se resuelve la inclusión de servicios HSDPA en la matriz de estados, dejando para una sección posterior los demás cálculos.

Entonces, hay múltiples factores a tener en cuenta y que dificultan el dimensionado de HSDPA. Algunos de ellos serán tenidos en cuenta y otros serán parte de la simplificación del modelo. Los aspectos más relevantes a considerar son los siguientes:

- En el DownLink, es un canal compartido con un scheduler²⁷ (despachador) que decide, en cada TTI²⁸, a qué usuario asignar los recursos disponibles.
- Este despachador, puede soportar un máximo de usuarios simultáneos ($MaxUE_{HS}$)

²⁶De hecho en el software, un servicio HSDPA es prácticamente igual a uno de R99 pero con el factor de actividad del downlink en cero, para que no ocupe recursos en el DL como lo hace un servicio de R99

²⁷Agente encargado de agendar recursos

²⁸Transmission Time Interval

- Para el UpLink, se abre un RAB más, por cada usuario que inicie una sesión HSDPA.

Por lo tanto para agregar usuarios HSDPA al control de potencia se realiza lo siguiente.

- 1 Para el UpLink se considera el servicio HSDPA, como uno más de R99. De esta manera, la región a obtener, queda determinada por N_{poleUL} y el $ULLoad_{TOT}$ de la misma forma que los servicios R99.
- 2 Para el DownLink, al ser un canal compartido, no se limitará la región por ninguna fórmula, obteniendo el máximo número de usuarios, como el máximo que soporta el despachador de paquetes.
- 3 Los servicios R99, se verán afectados en el UpLink, en el $(Eb/I_0)_{min}$, según los factores de ajuste propuestos por Nortel (ver sección: 5.2.1).
- 4 Los servicios de R99, se verán afectados en el DownLink, a través de la potencia asignada a HSDPA. A mayor potencia HSDPA, menor será el factor de carga en el DL, y menor será la capacidad de la celda para los servicios R99.

5.4.4. Región por potencia: enfoque final

Para terminar de cerrar este enfoque, se muestran algunas figuras que resumen la idea hasta ahora.

Se consideran dos servicios, uno de R99 y uno de HSDPA. La figura 9 muestra cómo quedaría la región determinada por el UL y DL. La región final de estados válidos resulta de la intersección de las anteriores.

5.4.5. Región por códigos

En esta parte se explica el modelo para el caso de la limitación por códigos. Básicamente, como fue explicado en la sección 3 (página 11), la limitante por códigos es en el DownLink y el RAB de bajada de un servicio tiene asociado a un Spreading Factor (SF) que esta vinculado con el árbol de

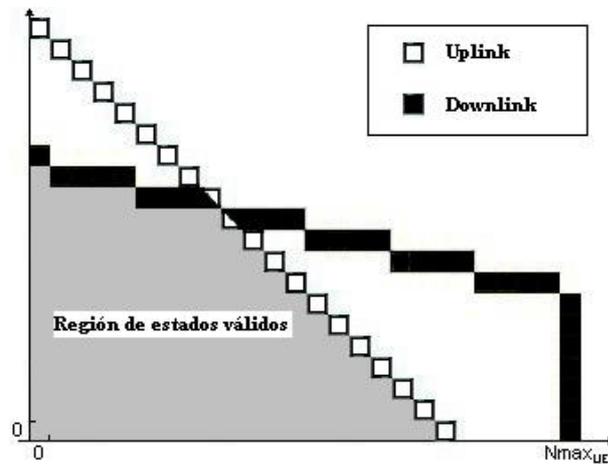


Figura 9: Región determinada por la intersección de UL y DL

códigos. Recordar que si un servicio R99 tiene un SF de 16 asociado al RAB de bajada, sólo podrán ingresar hasta un máximo de 15 usuarios de este servicio.

Para llevarlo al caso de k servicios diferentes, lo que se hizo fue aceptar en la matriz de estados, todas las combinaciones de N_1, \dots, N_k usuarios de cada servicio, que en la suma de SF respeten esta limitante.

Por ejemplo, si tenemos un servicio i de SF_i y otro servicio j de SF_j ($SF_i < SF_j$), si se tienen X_i usuarios del servicio i , podrán haber hasta $SF_j/X_i - 1$ usuarios del servicio j . Entonces, dado que el mayor *spreading factor* posible (para transmisión de datos) es 128, cada usuario de SF_i que ingrese al sistema, estará bloqueando el uso de $X_i \cdot \frac{128}{SF_i}$ códigos de $SF = 128$. Entonces, si se considera que se podrá bloquear hasta 128 códigos de SF 128, se deberá cumplir la siguiente condición:

$$\sum_{i=1}^k N_i \frac{128}{SF_i} \leq 128$$

Esta ecuación, es sólo para usuarios de servicios R99, en caso de haber HSDPA, la condición cambia. Esto es así ya que se tiene que configurar en la celda cuántos códigos de $SF = 16$ van a ser reservados para HSDPA. Si se utilizan C códigos de SF 16 para HSDPA, entonces aún con cero usuarios de R99, se estarán bloqueando $128 \cdot \frac{C}{16}$ códigos de SF 128. Entonces la condición

anterior se modifica por la siguiente:

$$\sum_{i=1}^k N_i \frac{128}{SF_i} < 128 \left(1 - \frac{C}{16}\right)$$

En las dos desigualdades anteriores, no se contemplan los códigos destinados para los canales de control, los cuales son de SF 128 y 256. Se desprecian ya que son relativamente pocos canales de control, y utilizan códigos que están muy abajo en el árbol, teniendo un impacto poco importante en la disponibilidad de los mismos.

5.4.6. Región por hardware

Como ya fue explicado en la sección 3 y en la 5.2.3, las limitaciones en hardware están dadas por los CE²⁹. Cada servicio de R99 tiene un costo de CE's asociado, y en el caso del equipamiento de Nortel, la radio base cuenta con una o varias placas de CE's (denominadas *CEM boards*). Estas placas, pueden tener 64 ó 128 CE's cada una, con lo cual es posible incrementar la capacidad de CE agregando placas extras. También hay que tener en cuenta, que se reserva una cantidad determinada de CE's para el procesamiento de los canales de control³⁰.

Por lo tanto, para cortar la matriz de estados debido a los CE's, se consideran las combinaciones posibles de usuarios que satisfagan la siguiente desigualdad:

$$\sum_{i=1}^k N_i \cdot CEcost_i \leq CE_{TOTAL} - CE_{CONTROL}$$

en donde $CEcost_i$ es el costo en CE's que tiene un usuario del servicio i ³¹, CE_{TOTAL} es la cantidad de CE que dispone la radio base y $CE_{CONTROL}$ son la cantidad de CE's utilizados para control.

Es muy importante mencionar que de los tres tipos de recursos que determinan un posible corte de la cadena, el corte por CE's es el único que se

²⁹Channel Elements: elementos de procesamiento en banda base

³⁰Se reservan del orden de 14 CE's para control

³¹Ese costo viene dado por Nortel en su documentación, para cada RAB

modela contemplando toda la radio base (los tres sectores) y no una celda o sector aislado como en los casos anteriores. Esto significa que en el momento de resolver el modelo de Markov, se suman las tasas de arribos de cada servicios de los tres sectores. Esto es así, porque los CE's se usan a demanda indistintamente del sector que los esté requiriendo.

5.4.7. Solución de la matriz de estados

En las secciones anteriores, se presentaron los diferentes criterios utilizados para modelar el control de acceso a la celda. Lo anterior supone una herramienta que permite decidir si una mezcla (N_1, N_2, \dots, N_k) de usuarios de diferentes servicios es posible en la celda según el control de acceso que se aplique. Ahora veamos cómo usar esos criterios para poder obtener un cadena de Markov en tiempo continuo que modele la celda, y nos permita analizar su performance.

Formalicemos primero el concepto de *matriz de estados*. Lo primero que debemos aclarar, es que la *matriz de estados* no es en general una matriz. Nosotros abusaremos del lenguaje para referirnos a lo que en realidad es un arreglo multidimensional, con tantas dimensiones como servicios tenga la mezcla definida por el usuario. Por ejemplo, si sólo existe un único servicio en la celda, la *matriz de estados* será simplemente un vector de $N_{max} + 1$ entradas, donde N_{max} es el número máximo de usuarios permitidos en la celda. Del mismo modo, si se tiene dos servicios, se tendrá una verdadera matriz de dimensión $N_{1max} \times N_{2max}$, y si se tienen más cantidad de servicios se obtendrá un arreglo multidimensional de enteros, con tantas coordenadas como servicios tenga la celda. Las entradas de la *matriz de estados* se interpretan de modo tal que, para el caso de dos servicios, la entrada de coordenadas $(n_1; n_2)$ representa el estado de la celda en el cual se tiene n_1 usuarios del servicio 1 y n_2 del servicio 2. La entrada correspondiente a dicha coordenada, será un entero distinto de cero en el caso de que ese estado sea posible. Es decir, la celda implementa un control de acceso que limita la cantidad de usuarios que ingresan a la misma, ya que los recursos de radio disponibles son finitos. Entonces el modelo se comporta de modo tal que es posible que la celda pueda estar en los estados $(n_1; 0)$ y $(0; n_2)$, pero puede suceder que no sea posible estar en el estado $(n_1; n_2)$ por no contar con recursos suficientes para esta cantidad y combinación de usuarios. En ese caso la entrada de la *matriz de estados* correspondiente a las coordenadas $(n_1; n_2)$ tendrá almacenado el valor cero, mientras que las entradas $(n_1; 0)$ y $(0; n_2)$ tendrán un

valor entero distinto de cero que será además su *número de estado*.

Como ya fue mencionado, la idea es trabajar con una mezcla de k servicios, los cuales en una primera instancia serán de R99. Cada uno de estos, tienen arribos según un proceso de Poisson de tasa λ_i y duración exponencial de parámetro μ_i . Una vez que se tiene la *matriz de estados* posibles, y los λ y μ de cada servicio, lo que tenemos es la información de una cadena de Markov en tiempo continuo que modela la dinámica de nuestra celda. Entonces estamos en condiciones de obtener el generador infinitesimal de la cadena: la *matriz* Q . Los parámetros λ_i y μ_i con $i = 1, \dots, k$, pueden estimarse para la *busy hour* mediante:

$$\hat{\lambda}_i = \text{cantidad de solicitudes de establecimiento del servicio } i \text{ en la busy hour}$$

$$\hat{\mu}_i = \frac{1}{\text{promedio de la duración para el servicio } i \text{ en la busy hour}}$$

Ahora, si π es la distribución estacionaria de probabilidad de la cadena³², la probabilidad de estar en algún estado de la frontera³³ de la matriz de estados es:

$$p_F = \sum_{x \in F} \pi(x)$$

donde $F = \{\text{conjuntos de estados que determinan la frontera de la matriz de estados}\}$.

Resumiendo, resolviendo el sistema lineal $\pi * Q = 0$ se tiene π , y a partir de allí la probabilidad de bloqueo de cada uno de los servicios en la mezcla, así como otras medidas de interés asociadas a la esperanza de la cadena (cantidad de usuarios promedio, throughput promedio de la celda, etc.).

Ahora, cuando se consideran uno o más servicios de HSDPA presentes en la mezcla, nos encontramos con los siguientes problemas:

- Cuando se plantea más de un servicio HSDPA, no se puede obtener una tasa de arribos para cada servicio HSDPA en la BH. Esto se debe a que

³² $\pi(N)$ es la probabilidad de que la celda esté en el estado N , donde N es el número de estado (arbitrario) asociado a una combinación determinada de cantidad de usuarios de cada servicio de la mezcla definida por el usuario.

³³Un estado pertenece a la frontera de la matriz de estados si, para al menos uno de los servicios de la mezcla, el control de acceso negará el ingreso de un usuario más de dicho servicio por no contar con recursos suficientes.

los contadores con los que se determina la tasa de arribos, cuentan todos los intentos de establecimiento de un servicio HSDPA, sin distinguir el tipo de usuario³⁴ Sin embargo es necesario modelar, aunque sea de forma *gruesa*, el hecho de que no todos los usuarios de HSDPA utilizan el servicio de la misma forma, y que esas diferencias se *sienten* en la performance de la celda. Por ejemplo, un usuario HSDPA de tipo *peer2peer* podrá permanecer mucho tiempo en la celda, tal vez horas, descargando continuamente, lo que supone un consumo de recursos de radio importante. También podría ser que el usuario sea *tipo mail* y acceda a la celda simplemente para chequear su casilla de correos, con lo cual es probable que sólo permanezca conectado unos pocos minutos y solamente descargue un par de *archivos de texto*. Usuarios como los anteriores tienen un efecto muy distinto en lo que se refiere al uso de recursos de la celda, y esas diferencias se trasladan notoriamente a la performance de la celda. La intuición dice que en la BH, la celda pueda tener más usuarios tipo *mail*, que usuarios tipo *peer2peer*.

Por lo tanto surge la necesidad de distinguir entre servicios de HSDPA. Para ello se considerará que cada servicio representa un porcentaje determinado del total de usuarios HSDPA de la mezcla. Con lo anterior es posible distinguir la cantidad de arribos de uno y otro servicio de la siguiente manera:

$$\hat{\lambda}_i = \lambda_{HS_{TOT}} \times \text{PorcentajeMezclaHS}_i$$

en donde $\sum_i \text{PorcentajeMezclaHS}_i = 1$ y $\lambda_{HS_{TOT}}$ es la tasa de solicitudes de establecimiento del servicio HSDPA.

- Otro punto importante, es el tema de la duración media del servicio. Esta duración no es la misma en todo momento, dado que el throughput medio por usuario HSDPA varía básicamente en función de la potencia y códigos asignados a HSDPA, y la cantidad de usuarios totales de HSDPA que comparten el canal de bajada.

Para resolver esto se suponen conocidos los siguientes parámetros (algunos definidos en la sección 5.2.2):

- $UE_{th1}(P_{HS})$ ³⁵: Depende de la potencia asignada a HSDPA, por lo tanto variará para cada configuración de potencia elegida.

³⁴No hay forma de saber si el usuario va a ser tipo *peer2peer* o simplemente descargará unos pocos mails antes de liberar el servicio

³⁵Single User Throughput: el th. alcanzado por un usuario, cuando es el único usuario HSDPA presente en la celda

- $UEthmin$: El el throughput mínimo que se desea asegurar a los usuarios HSDPA (recordar que es un servicio *best effort*).
- $MUG(N_{HS})$ ³⁶: Ganancia por multiplexado, donde N_{HS} es el número de usuarios HSDPA simultáneos. Como suele pasar en un canal compartido, se aprovechan mejor los recursos cuanto más usuarios los estén compartiendo, principalmente por el hecho de que se hace menos probable que ninguno de ellos este activo en un instante dado.
- $TamArchivoDesc$: Cada tipo de servicio HSDPA diferente (mail, peer2peer), deberá tener asociado un tamaño promedio de descarga. Esto es, la cantidad promedio de bits que un usuario HSDPA de tal tipo descarga en lo que dura su sesión.

Con estos parámetros, el tiempo de permanencia promedio de un usuario HSDPA queda como sigue:

$$\hat{\mu}_i = \frac{TamArchivoDesc_i \times N_{HS}}{UEth1 \times MUG(N_{HS})}$$

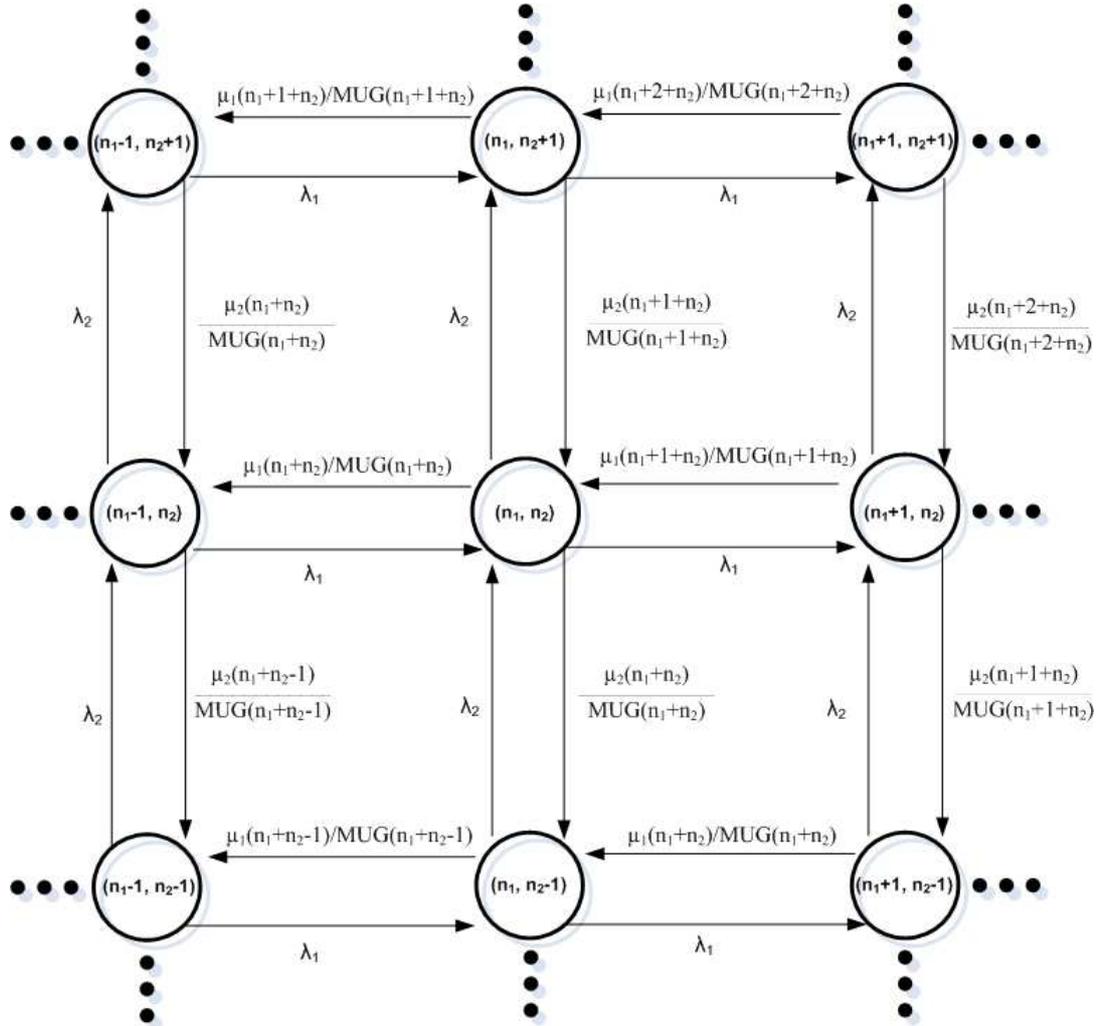
donde N_{HS} es la cantidad total de usuarios HSDPA compartiendo el canal.

Con estos λ_i y μ_i definidos para todos los servicios es posible calcular la probabilidad de bloqueo de los mismos, y obtener también el valor esperado en esta cadena. Si bien no tiene sentido la probabilidad de bloqueo de servicios HSDPA, la resolución de la cadena permitirá hallar parámetros de interés como por ejemplo el throughput promedio por usuario HSDPA, el th. de la celda en tráfico HSDPA, la cantidad media de usuarios HSDPA instantáneos, entre otros.

A modo de resumen, la figura 10 ilustra la cadena de Markov en presencia de dos tipos de usuarios del servicio HSDPA. Obsérvese que el tiempo medio de permanencia de un usuario HSDPA, depende de la cantidad total de usuarios HSDPA, y del tamaño traficado por ese tipo de usuario HSDPA.

En la siguiente sección, se caracteriza a la celda y los servicios para poder resolver el problema de hallar la región deseada y de resolver el modelo de Markov.

³⁶Multi User Gain



$$\lambda_{HS_Tot} = \lambda_1 + \lambda_2$$

$\sigma_1 = \lambda_1 / \lambda_{HS_Tot}$ Porcentaje de usuarios "tipo 1" en la mezcla HSDPA

$\sigma_2 = \lambda_2 / \lambda_{HS_Tot}$ Porcentaje de usuarios "tipo 2" en la mezcla HSDPA

TA_1 = Tamaño de descarga 1

TA_2 = Tamaño de descarga 2

$$\mu_1 = TA_1 / UEth1$$

$$\mu_2 = TA_2 / UEth1$$

Figura 10: Cadena de Markov para dos servicios HSDPA

5.5. Modelado de los servicios y la celda

5.5.1. La Celda

El modelo general toma en cuenta la interacción, no sólo entre servicios de R99 (CS y PS)³⁷ sino también de los anteriores con servicios HSDPA. O sea, puede haber varios tipos de tráfico diferentes (distintas aplicaciones) compartiendo los recursos de la red. Por esto, para caracterizar una celda, debemos poder conocer una gran cantidad de parámetros. A continuación se listan los parámetros indicando para qué parte del modelo son necesarios. También mencionaremos otros parámetros que no son de la celda, pero si del modelo del sistema.

Parámetros vinculados directamente con la celda

Parámetros	Descripción	Ubicación en el modelo
MaxTxPower	Potencia de la celda	Dim. potencia
Pccc	Potencia canales comunes	Dim. potencia
PotHSDPA	Potencia asignada a HSDPA	Dim. potencia. Resolver cadena
CodHSDPA	Códigos asignados a HSDPA	Dim. códigos
CEtotal	CE totales	Dim. CE
CEcontrol	CE destinados a control	Dim. CE
Uiloaddtot	Factor de carga UL	Dim. potencia
NumMaxUE	Nmax de scheduler HSDPA	Dim. potencia
UEth1	Single User Throughput	Resolver cadena
MUG	Ganancia multiplexado	Resolver cadena
UEthmin	Throughput a garantizar	Resolver cadena

Parámetros vinculados con el sistema

Parámetros	Descripción	Ubicación en el modelo
Entorno	Entorno de la celda	Dim. x potencia
W	Ancho de banda WCDMA	Dim. x potencia
Nf	Ruido del móvil	Dim. x potencia
No	Ruido Térmico	Dim. x potencia
FactorInterf	Interferencia I_e/I_i	Dim. x potencia
GSH	Ganancia de soft handover	Dim. x potencia

³⁷Circuit Switched y Packet Switched

5.5.2. Servicios

Como ya fue mencionado en la introducción, un usuario UMTS puede abrir varias sesiones con diferentes aplicaciones, a los efectos del modelo, si un usuario abre dos aplicaciones (uso de dos servicios diferentes) se considerará como si fueran dos usuarios, uno de cada servicio. Con esto claro, para caracterizar un servicio, se tendrán en cuenta los siguientes puntos:

- Todos los servicios de R99 que se modelan (CS y PS), quedan caracterizados por un RAB de subida (RAB_{UL}) y uno de bajada (RAB_{DL}). Para modelar el uso de ese servicio y por lo tanto el uso de los RAB's tanto en el UL como en el DL, se asocian al los RAB's de ese servicio un factor de actividad (act_{UL} y act_{DL}).

Si a estos parámetros se le suman la tasa de arribos λ y la duración promedio del servicio en la *busy hour* $\frac{1}{\mu}$, se tendrá caracterizado un servicio R99 de la mezcla.

- Para modelar los servicio de HSDPA, se le adjudica un RAB_{UL} y por lo tanto un un factor act_{UL} . Como la duración del servicio en la BH depende de lo que se quiere descargar y de la velocidad de descarga que a priori es desconocida, se modela con un tamaño medio de descarga ($TamArchivoDesc$) asociado al tipo de servicio HSDPA.

Por otro lado, como no es posible obtener un valor de tasa de arribos HSDPA que discrimine entre arribos de usuarios de diferente tipo de uso del servicio (mail, peer2peer), se modela al servicio con un porcentaje de proporción sobre el total de HSDPA ($PorcentajeMezclaHS$). Este valor junto a la tasa de arribos totales de HSDPA, determinan la tasa de arribos por servicio HSDPA.

El siguiente cuadro resume los parámetros que modelan un servicio.

Parámetros de servicio R99

Parámetros	Descripción	Qué lo define
λ	Tasa de arribos de solicitudes	Perfil de tráfico del servicio
μ	Inverso de la duración media	Perfil de tráfico del servicio
RAB UL	Rate de subida	El perfil de QoS
RAB DL	Rate de bajada	El perfil de QoS
actUL	Actividad en el UL	Modelado del uso del servicio
actDL	Actividad en el DL	Modelado del uso del servicio
SIRUL	SIR mínima en el UL	Recomendaciones del 3GPP ³⁸
SIRDL	SIR mínima en el DL	Recomendaciones del 3GPP
LossSIR	Ajuste del SIR con HSDPA	Recomendaciones del 3GPP

Parámetros de servicio HSDPA

Parámetros	Descripción	Qué lo define
γ	Porcentaje sobre el total del tráfico HSDPA	Perfil de tráfico
TamArchivoDesc	Bits descargados por sesión	Perfil de tráfico del servicio
RAB UL	Rate de subida	El perfil de QoS
actUL	Actividad en el UL	Modelado del uso del servicio
SIRUL	SIR mínima en el UL	Recomendaciones del 3GPP

5.6. ¿Qué más modelar?

Para poder cerrar el modelo, faltan los resultados de throughput de la celda, y para el caso de HSDPA, la tasa de arribos máxima de usuarios que se puede admitir en la BH. Para el caso de R99 esto es sencillo, ya que una vez obtenida la matriz de estados, es posible calcular la esperanza, y junto con los rate de cada servicio obtener valores de throughput de la celda. Para HSDPA esto es un poco más complicado, por lo que se toma como referencia el modelo de Nortel para este análisis, adaptándolo a las necesidades del caso.

Nortel, para obtener el número máximo de usuarios en la BH dada una potencia asignada a HSDPA, básicamente plantea el corte de dos curvas. Dichas curvas son dos maneras independientes de expresar una misma magnitud: el throughput de la celda (ver sección 5.2.2 página 31). Este corte de curvas determina la siguiente ecuación:

$$CellTh_{BH} = UEth1 \sum_{n>1} p(n) MUG(n) NinBH(HS) = \frac{CellTh_{BH}(HS)}{ErlUserUEthmin}$$

A continuación se señalan algunas particularidades del método propuesto por Nortel.

1. Se realiza un análisis en donde sólo se considera HSDPA (no se modela la influencia de los servicios R99) y se simplifica aun más tomando un único servicio HSDPA, o dicho de otra forma, sin distinguir entre tipos distintos de uso del servicio HSDPA.
2. El valor de $p(n)$ es la probabilidad de que haya n usuarios HSDPA simultáneos en la celda. Nortel lo halla mediante la expresión que resulta de suponer una cola $M/M/\infty$. En dicha expresión, se promedia la duración de las sesiones HSDPA (entre otros parámetros). Lo anterior supone una simplificación importante, ya que la duración de las sesiones HSDPA es desconocida a priori, y depende entre otras cosas del throughput promedio obtenido por los usuario, la cantidad de usuarios, y la cantidad de bits totales descargados durante la sesión. Dado que el modelo markoviano ajustado contempla la existencia de distintos *tipos de servicio* HSDPA, elegimos determinar la probabilidad de tener n usuarios HSDPA resolviendo la cadena correspondiente.
3. *ErlUser*: Nortel lo define como el tiempo promedio de permanencia de un usuario HSDPA, sobre la duración de la hora pico (3600seg.). Como se mencionó, éste es un valor variable y desconocido a priori. Sin embargo el modelo propuesto por Nortel lo considera fijo. El modelo ajustado en este trabajo, aprovecha la información de la dinámica de la cadena de Markov, para obtener una estimación del throughput promedio de un usuario HSDPA, y usando el tamaño de descarga promedio, se estima el tiempo medio de permanencia de usuarios HSDPA.

Para arribar a un resultado, en [1] se propone considerar dos expresiones distintas para el throughput de la Celda ($CellTh$) y luego, teniendo en cuenta que el $CellTh$ debe ser único, hallar la tasa de arribos HSDPA que resulta en el corte de las dos expresiones del $CellTh$. La primera curva propuesta por Nortel, intenta modelar el $CellTh_{BH}$ mirado desde el punto de vista de

la celda. Esta curva, la tomaremos de la misma manera. La segunda curva que plantea, modela también el $CellTh_{BH}$ pero desde el punto de vista del usuario, el cual se asume que experimenta un throughput promedio igual a $UEth_{min}$, siendo este valor el throughput mínimo que el operador desea asegurar a sus usuarios HSDPA. Esta curva es la que modificaremos debido a que no contempla la existencia de diferentes tipos de servicios HSDPA. El modelo elegido es el siguiente:

$$CellTh = \frac{UEth_{MIN}}{UEth_1} \sum_{i=1}^{NmaxUE} \left(\frac{p[i] * i}{MUG[i] * (1 - p[0])} \right) \sum_{i=1}^k (TamArchivoDesc_k * \lambda_{HS_i})$$

donde:

- $NmaxUE$, es la máxima cantidad de usuarios HSDPA que pueden haber simultáneamente.
- k , denota la cantidad de servicios HSDPA en la mezcla.
- $\lambda_{HS_i} = \lambda_{HS_{TOT}} * PorcentajeMezclaHS_i$, es la tasa de arribos del servicio i de HSDPA.
- La primera sumatoria junto con el $UEth_1$, denota la esperanza del throughput condicionado a que hay un usuario HSDPA.
- La segunda sumatoria es la esperanza del valor $ErlUser$ (factor de actividad).

Con estas dos ecuaciones e igualando el $CellTh$, el $NinBH_{MAX}$ es aquel que verifica lo siguiente:

$$UEth1 \sum_{n=1}^{NmaxUE} (p[n]MUG[n]) = \frac{UEth_{MIN}}{UEth_1} \sum_{i=1}^{NmaxUE} \left(\frac{p[i] * i}{MUG[i] * (1 - p[0])} \right) \sum_{i=1}^k (TAdesc_i * \lambda_{HS_i}) \quad (9)$$

Este valor de $NinBH$, se utiliza para hallar $p[i]$ y λ_{HS_i} , por lo que es necesario iterar para hallar $NinBH$. Las siguientes figuras muestra el punto de corte de estas dos curvas al variar el $UEth_1$:

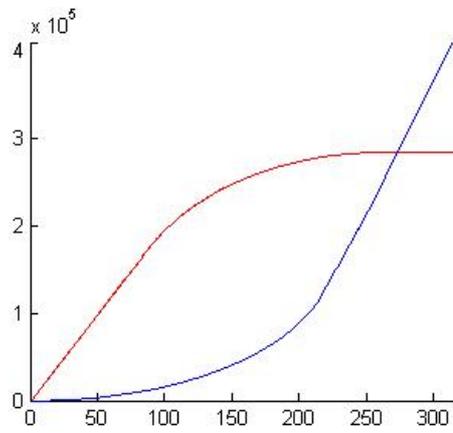


Figura 11: Corte de curvas

Con este valor de N_{inBH} , estamos en condiciones de calcular el $CellTh$ de la celda.

6. Desarrollo de software

En esta sección realizamos un resumen de los temas asociados al desarrollo del software. Comenzaremos explicando el proceso de diseño del software, y luego analizaremos los conceptos más importantes de la implementación del mismo, especificando para los casos de uso los diagramas de interacción entre las clases de software.

El lector podrá encontrar en la sección 12 un *manual de usuario* que explica cómo utilizar la herramienta desarrollada.

6.1. Análisis y Diseño del Software

Modelo del Dominio

Para construir el Modelo de Dominio, es necesario identificar los conceptos o ideas más importantes que aparecen en juego. Para identificar estos conceptos, existe un método muy sencillo que se basa en subrayar las ideas más importantes que aparecen en los objetivos del software (como se muestra a continuación), para luego construir el Modelo de Dominio con esas ideas.

Básicamente el objetivo del proyecto fue:
Desarrollar un software para resolver un Modelo de una Celda UMTS, para poder calcular las probabilidades de bloqueo, tasas de arribo, etc, de los servicios (R99/HSDPA), que se configuran en la celda por el usuario.

En la figura 12 aparecen los conceptos más importantes, así como las relaciones entre estos conceptos, y los atributos más representativos.

Como se observa en la figura 12, el software necesita determinados parámetros de entrada, mandatorios para poder realizar los cálculos y el análisis. Los dos grandes elementos de entrada son la *Celda* y el conjunto de *Servicios* que se desea ofrecer. Básicamente la celda queda definida con el entorno, la potencia, y algunos factores que modelan las condiciones de radio y particularidades de la tecnología 3G. Por otro lado, los servicios quedan definidos por su nombre, y el perfil de tráfico (tasa de arribos, duración promedio, y factores de actividad). Podemos distinguir dos tipos de servicios : servicios R99 y servicios HSDPA. En base a estos elementos, el software resuelve un

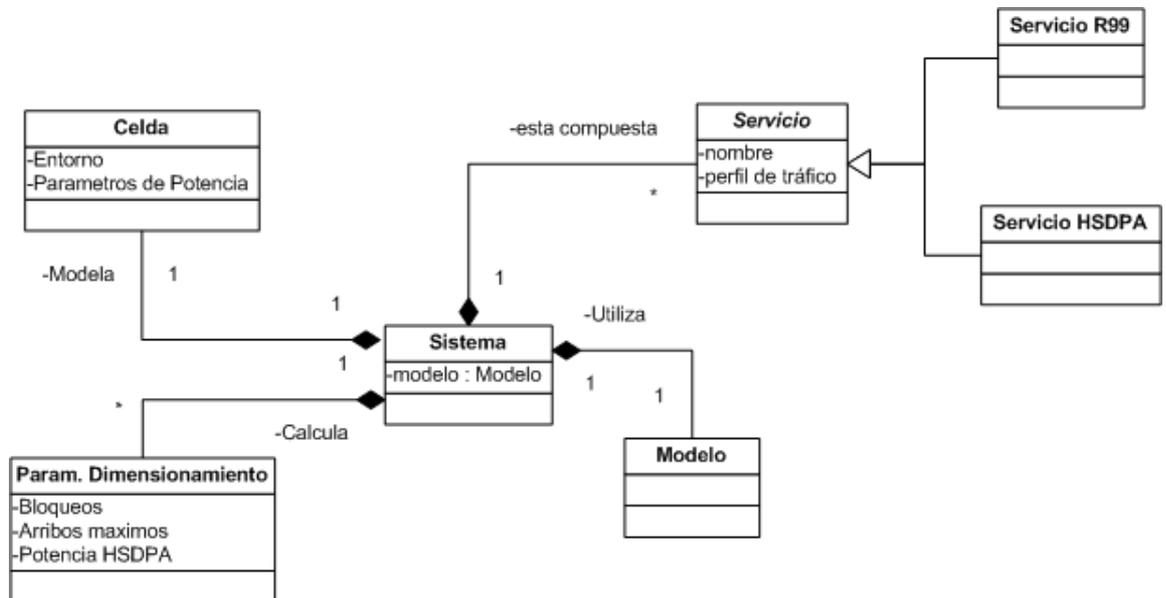


Figura 12: Modelo del Dominio

modelo, que incluye herramientas del modelo de Markov y otros métodos numéricos que fueron descritos en la sección anterior. Con dichos cálculos, se obtienen parámetros de interés para el dimensionamiento como son: los bloqueos de los distintos servicios, las tasas de arribos máximos, entre otros.

Casos de uso

El próximo paso fue construir (interactuando con el cliente), los distintos casos de uso que fueron mencionados en la sección anterior. A continuación se presentan los 7 casos de uso definidos, en formato breve:

1. Bloqueos servicios *R99* por potencia.

El usuario ingresa la configuración de la celda y de los servicios de *R99* (hasta un máximo de 5 servicios). Todos los parámetros que el usuario no ingrese, quedarán con su valor por defecto. El usuario puede indicar si quiere tener en cuenta la limitación de capacidad por cantidad de códigos. El caso de uso devuelve las probabilidades de bloqueo por servicio, y en caso de no haber seleccionado el corte por códigos, devuelve también la cantidad de estados que serían inválidos por falta de códigos.

2. Bloqueos servicios *R99* por Channel Elements (capacidad de banda

base).

El usuario ingresa la configuración de la celda y de los servicios de R99 (hasta un máximo de 5 servicios). Todos los parámetros que el usuario no ingrese, quedarán con su valor por defecto. El usuario deberá configurar los servicios por sector, ya que este análisis es sobre la celda completa (3 sectores). El caso de uso devuelve las probabilidades de bloqueo por servicio debido a falta de CE's.

3. Crecimiento proporcional de servicios *R99*.

El usuario deberá ingresar la probabilidad de bloqueo máxima para los servicios CS (Voz, Video-llamada, etc) y PS (Web, streaming, WAP). A estos bloqueos denominamos *bloqueos objetivos*. El caso de uso devuelve la tasa de arribos máxima que el sector ofrece, y las probabilidades de bloqueo de cada servicio, respetando las probabilidades de bloqueo objetivo seteadas. Las tasas de arribos respetan las proporciones iniciales. Este caso de uso simula un crecimiento proporcional uniforme en la demanda de tráfico de todos los servicios. Observación: este caso se puede utilizar para analizar una celda homogénea (un solo servicio en la celda), obteniendo la tasa de arribos máxima y por ende la cantidad de Erlangs de ese servicio.

4. Análisis de R99 + HSDPA con potencia on demand (Arribos máximos).

El usuario ingresa la configuración de la celda y de los servicios de R99 y HSDPA (hasta un máximo de 5 servicios). Se estudia la capacidad con potencia on demand en la celda para HSDPA respetando los bloqueos para los servicios R99 y garantizando un throughput mínimo por usuario. El caso de uso devuelve la tasa de arribo máximo para HSDPA, y el porcentaje de potencia destinada a HSDPA para la cual se da el arribo máximo.

5. Análisis de R99 + HSDPA con potencia on demand (Throughput mínimo asegurado).

El usuario ingresa la configuración de la celda y de los servicios de R99 y HSDPA (hasta un máximo de 5 servicios). Se estudia el throughput mínimo asegurado en HSDPA con potencia on demand en la celda respetando los bloqueos para los servicios R99. El caso de uso devuelve el throughput mínimo asegurado para HSDPA, y porcentaje de potencia destinada a HSDPA para la cual se asegura ese throughput.

6. Análisis de R99 + HSDPA (a potencia fija).

El usuario ingresa la configuración de la celda y de los servicios de R99 y HSDPA (hasta un máximo de 5 servicios). El caso de uso devuelve las probabilidades de bloqueo de cada servicio R99 en la presencia de servicios HSDPA.

7. Análisis conjunto de servicios HSDPA con potencia fija.

El usuario ingresa la configuración de la celda y de los servicios HSDPA (hasta un máximo de 5 servicios). El caso de uso devuelve la tasa de arribos máxima, throughput promedio por usuario HSDPA, número de usuarios HSDPA esperado, throughput promedio de la celda.

Descripción de paquetes

Luego de definir los casos de uso, pasamos a definir los paquetes que componen el software en base a sus responsabilidades. Se consideró dividir el software en 5 paquetes, ellos son: umts, herramientas, casos de uso, e interfaz.

- umts

Este paquete contiene todos los parámetros de entrada al sistema, es decir la celda y los servicios. Se denomina “umts” ya que es el nombre más representativo para nuclear estos elementos. En la definición de servicios, se hace una distinción entre los servicios de R99 y HSDPA que contienen algunas características diferentes, y además previendo el agregado de servicios en HSUPA en el futuro.

- herramientas

Como lo dice su nombre, este paquete contiene todas las herramientas necesarias para resolver el modelo, realizar cálculos y obtener resultados. Podemos distinguir dos grandes grupos de herramientas; las herramientas que ofrece la teoría de cadenas de Markov y por otro lado las herramientas o criterios propios del modelo desarrollado. La diferencia radica, en que las primeras herramientas (cadenas de Markov), son de uso genérico, mientras que las otras herramientas son de uso específico de este modelo. Es decir que el software contempla el hecho de poder agregar nuevos criterios (herramientas) para la resolución del modelo. La idea fue diseñar estas herramientas con bajo acoplamiento.

- casos de uso

Este paquete es el cerebro del sistema. Es quien conoce los parámetros de entrada definidos y utiliza las herramientas adecuadas para resolver los distintos casos de uso.

- interfaz

Aquí se ubican todas las clases que componen la interfaz gráfica y que permiten la interacción del usuario con el software. Un detalle importante a destacar, es que la interfaz se desarrolló de forma totalmente independiente del software. Es decir que se puede eliminar la interfaz y crear una nueva, sin perder los métodos y clases esenciales del software. Otra característica de la interfaz es que contiene elementos de control para los valores ingresados por el usuario, de forma de evitar incoherencias en los cálculos.

6.2. Implementación del Software

Teniendo como base el diseño realizado, se implementaron las clases que componen el software.

Básicamente en esta etapa, se escribió el código en lenguaje Java correspondiente a las distintas clases y subsistemas. Se utilizó para ello la versión de JRE 1,6,03. Luego de integrar todos los componentes, se realizaron pruebas de integración sobre todo el sistema.

En la figura 13 presentamos un breve diagrama de paquetes.

6.2.1. Paquete umts

Profundizando en la estructura del software, nos detenemos a observar las clases y métodos principales. Como mencionamos anteriormente, el paquete umts contiene las clases que suministran la entrada del sistema.

DatosPorDefecto

Método cargarDatos(): El software carga determinados datos por defecto que son utilizados en el modelo, pero que son relativamente “estáticos”, ya que son parámetros tabulados, que de acuerdo al entorno de la celda toman

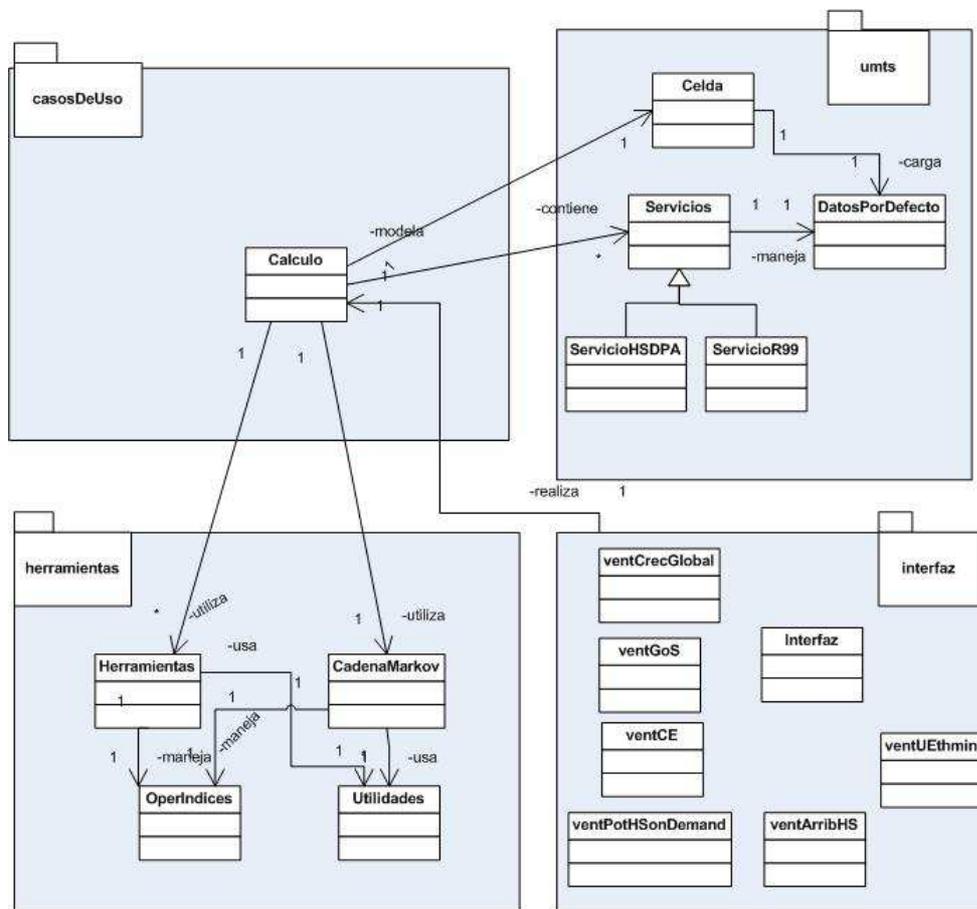


Figura 13: Diagrama de Paquetes

un valor fijo. Por lo tanto el software cuando se ejecuta, levanta del archivo de configuración “config.properties” estos parámetros y son seteados en esta clase. Si el usuario desea cambiar en algún momento estos parámetros, basta con cambiarlos en el archivo de configuración mencionado y cuando se ejecute el software se tomarán estos cambios.

Celda

Se invoca en forma única, ya que el estudio se realiza siempre tomando como base una única celda (radio base) con determinadas características. Contiene los métodos get y set necesarios para trabajar con sus atributos.

Servicio

Esta clase es abstracta, ya que todo servicio cuenta con un conjunto de atributos y métodos en común ya sean de R99, HSDPA, o en un futuro HSUPA.

ServicioR99 y ServicioHSDPA

Estas dos clases heredan de la clase servicio, y se diferencian en algunos atributos.

6.2.2. Paquete herramientas

CadenaMarkov

Esta clase contiene los métodos propios del modelo markoviano:

Método hallarMatrizEstados: Realiza una cadena en múltiples dimensiones de acuerdo a la cantidad de servicios.

Método armarMatrizQ: arma el “generador infinitesimal” como se le conoce en el modelo markoviano.

Método hallarPI(): Resuelve la ecuación $pi * Q = 0$.

Herramientas

Contiene métodos genéricos que son utilizados junto a la clase CadenaMarkov para resolver los cálculos:

Método estadoValido: Este método establece si un estado es válido o no y por ende si forma parte de la matriz de estados.

Métodos hallarDifCellTh y hallarCellTh: Estos métodos sirven para hallar el throughput de la celda. El método hallarDifCellTh realiza el corte de las dos curvas de throughput (ver sección 5).

OperIndices

Esta clase le da al sistema la estructura necesaria para poder realizar cadenas en múltiples dimensiones:

Métodos `aumentoServI`, `HasNext`: métodos para recorrer la cadena.

Método `getDimFront`: método para determinar las dimensiones de los ejes.

Utilidades

Como lo dice su nombre sirve de apoyo con métodos para convertir unidades (`dbm2normal`, `normal2dB`) y métodos para imprimir en consola las matrices de estados o vectores que pueden ser de utilidad en caso de extender el software.

El criterio para dividir las clases, fue en base a sus responsabilidades:

- la clase *CadenaMarkov* resuelve solamente el modelo markoviano, el cual es un modelo matemático, independiente de esta aplicación en particular.
- la clase *Herramientas*, sí contiene conceptos propios del modelado de 3G, pero que se complementan con los anteriores.
- la clase *OperIndices* es exclusiva para poder manejar cadenas multidimensionales.
- la clase *Utilidades* contiene métodos generales que se usan en cualquier parte del software.

Este paquete sirve como base para llevar a cabo los casos de uso.

6.2.3. Paquete casos de uso

Calculo

Esta clase contiene la lógica necesaria para resolver los casos de uso. Utiliza las clases del paquete herramientas para ello, teniendo como base una “celda” y un conjunto de “servicios”.

Método `calcularBloqueos`: calcula los bloqueos de una mezcla de servicios debido a potencia y/o falta de códigos.

Método crecimientoGlobal: devuelve la tasa de arribos máxima que el sector ofrece, y las probabilidades de bloqueo de cada servicio, respetando las probabilidades de bloqueo objetivo).

Método bloqueoCE: calcula los bloqueos de una mezcla de servicios debido a falta de Channel Elements (CE).

Método hallarLambdaHS: método que devuelve la tasa de arribos máxima de HSDPA para una potencia fija y una mezcla de servicios únicamente de HSDPA.

Método potHsOnDemand: este método calcula, si existe, la potencia libre HSDPA y la tasa máxima de arribos HSDPA que asegura un throughput mínimo por usuario.

Método potHsOnDemandUEthmin: este método devuelve el máximo throughput mínimo ofrecido por usuario HSDPA.

6.2.4. Paquete interfaz

El paquete interfaz contiene todas las clases que componen las distintas ventanas del sistema, y permiten al usuario interactuar con el mismo.

La clase *Interfaz* es la ventana principal del programa, en la cual se encuentran los menús para acceder a las distintas ventanas. Luego, de acuerdo a lo que presiona el usuario, se abren las ventanas *VentCelda* y *VentServicio* para configurar la celda y los servicios respectivamente, o las ventanas para correr los casos de uso (*VentUEthmin*, *VentBloq*, etc).

Independencia de interfaz gráfica

Uno de los objetivos en la implementación fue realizar la interfaz gráfica lo más independiente posible del resto del software. En este sentido, la tarea principal de la interfaz es presentar los datos al usuario, y ser el nexo entre éste y los distintos casos de uso.

Además la interfaz realiza un control a los datos ingresados, por ser el objeto responsable de recibir los eventos.

Resumiendo, la interfaz gráfica se encarga de invocar a los distintos casos de uso, por lo cual, en el futuro y si el cliente así lo desea, se puede cambiar el diseño de la interfaz, sin necesidad de cambiar las clases que componen el cálculo del modelo.

6.3. Diagramas de interacción

En esta sub sección, se detallan los diagramas de interacción para que el lector pueda comprender el modo en que los objetos interactúan entre sí por medio de mensajes.

Bloqueo de servicios R99 + HSDPA (por potencia ó por códigos)

Comenzamos por el caso de uso calcular Bloqueos por potencia, ya sea con un conjunto de servicios de R99 o un conjunto de servicios de R99 y HSDPA a una potencia fija asignada para HSDPA. Como se observa en la figura 14, el primer paso es hallar la matriz de estados, método que se ubica en la clase CadenaMarkov. Para esto, la clase CadenaMarkov recorre los distintos estados (apoyándose en la clase OperIndices), con la condición que el estado es válido si verifica la ecuación Npole en varias dimensiones como fue explicado en la sección 5.

El siguiente paso es hallar la matriz de transición de estados “Q”, para lo cual se necesita las dimensiones de la matriz de estados hallada anteriormente, además de la tasa de arribo y duración de cada servicio. Posteriormente se debe hallar PI (el vector con las probabilidades de los estados), para lo cual se resuelve una ecuación lineal $A \times B = 0$.

Finalmente se calculan los bloqueos de cada servicio en base al vector pi.

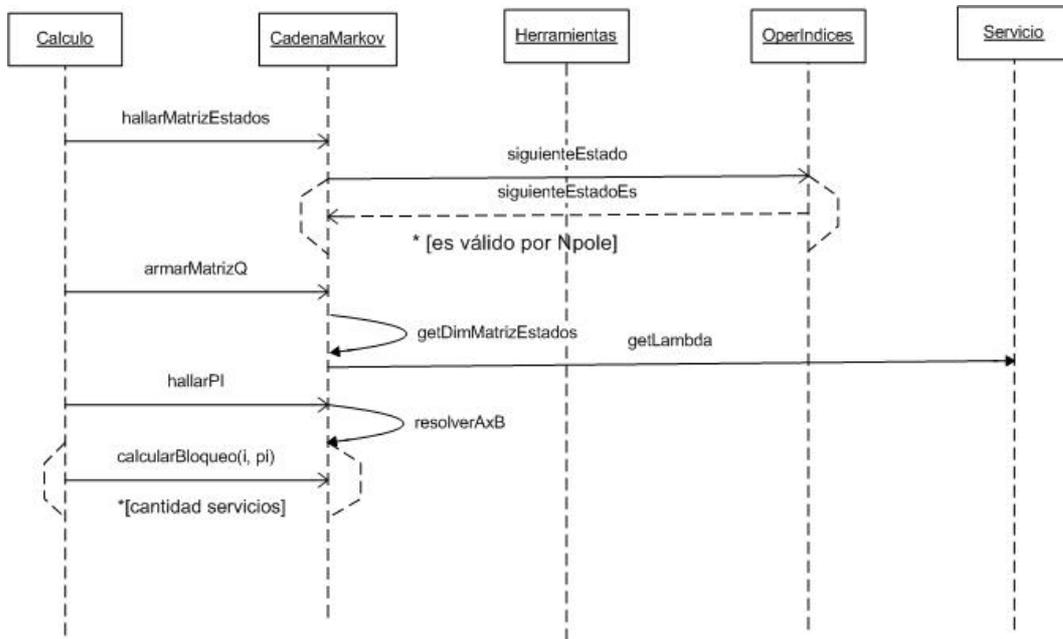


Figura 14: Diagrama de secuencia Calcular Bloqueos

Crecimiento Global

En el caso de uso crecimiento proporcional, en el cual se calcula la máxima tasa de arribos de cada servicio (manteniendo las proporciones entre ellos y cumpliendo que los bloqueos estén por debajo de los bloqueos objetivos, ver sección 4), también se comienza hallando la matriz de estados. Luego se halla la matriz Q, y el vector de probabilidades PI.

Luego se itera, variando las tasas de arribos de los distintos servicios y calculando los bloqueos, hasta que éstos sean menor que los bloqueos objetivos.

Bloqueo por Channel Elements (CE)

El caso de uso calcular bloqueo debido a falta de hardware disponible (Channel Elements, CE) es similar al caso de uso calcular bloqueo por potencia. El diagrama de secuencia es igual al de la figura 14, con la diferencia que la condición para armar la frontera no es la fórmula de Npole, sino el hecho de que de existan CE disponibles para determinada cantidad de usuarios de cada servicio.

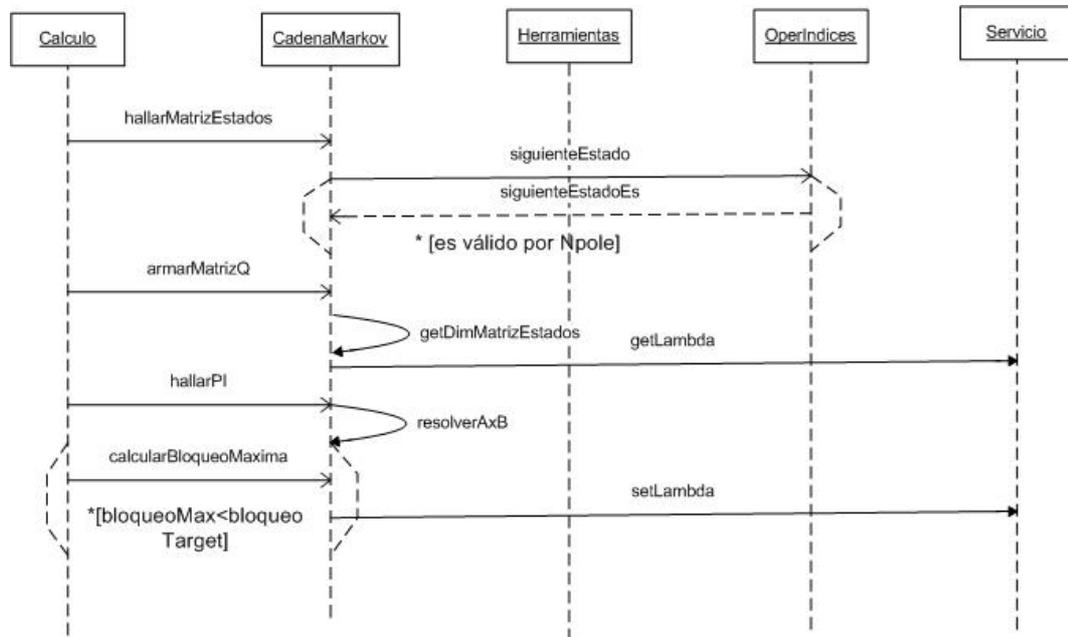


Figura 15: Diagrama de secuencia Crecimiento Proporcional

Potencia on demand: tasa de arribo máxima en HSDPA

Es este caso de uso, el propósito es hallar la tasa de arribos máxima para HSDPA con una mezcla de servicios R99 y HSDPA definida por el usuario, más una condición en el throughput mínimo que se quiere garantizar a los usuarios HSDPA.

Se comienza determinando la matriz de estados como en los casos anteriores. Luego se itera (para Potencia fija destinada a HSDPA = 0%, 5%, 10%, ...), hasta hallar la máxima tasa de arribos de HSDPA manteniendo los bloqueos de R99 por debajo de su valor objetivo como se muestra en la figura 16.

Potencia on demand: throughput HSDPA asegurado por UE

Este caso de uso es análogo al anterior con la diferencia que la tasa de arribos en este caso es una entrada al sistema y se desea obtener el throughput mínimo asegurado.

Potencia fija: arribos máximo de HSDPA

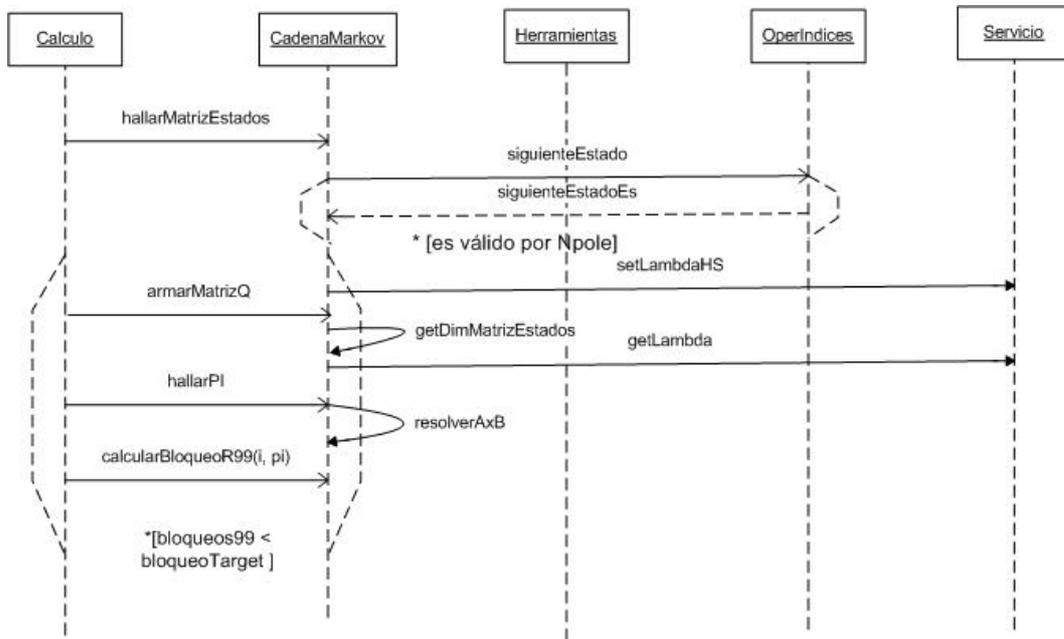


Figura 16: Diagrama de secuencia Potencia on demand: tasa de arribos HS

En este caso de uso se resuelven algunas ecuaciones planteadas por Nortel, para obtener la tasa de arribos máxima para una determinada potencia fija asignada a HSDPA. El método pretende hallar el corte entre una curva y una recta, lo que se ve reflejado en el parámetro *DifCellTh*.

Por lo tanto se itera, variando la tasa de arribos hasta obtener un valor de *DifCellTh* próximo a 0 como lo muestra el siguiente diagrama.

6.4. Algoritmos y métodos numéricos

Pasemos ahora a realizar un breve repaso de los aspectos más relevantes en cuanto a la implementación de algoritmos, y la selección de métodos numéricos para resolver e implementar el modelo y los casos de uso planteados.

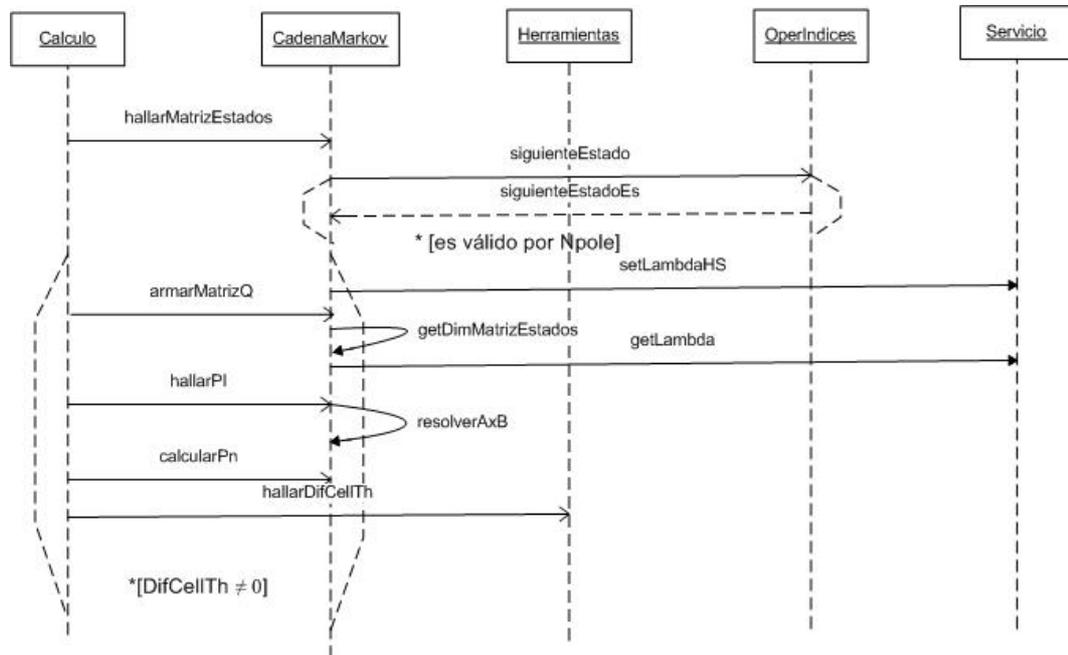


Figura 17: Diagrama de secuencia Potencia fija: arribos máximo de HSDPA

6.4.1. Obtención de la cadena de Markov

Comencemos pues con algunos detalles de la implementación del modelo markoviano. Si el lector no está familiarizado con los conceptos básicos de cadenas de markov, recomendamos la lectura del Anexo C. El modelo base considerado del sistema, implica que se deba determinar para cada caso de uso, una cadena de Markov en función de los perfiles de tráfico de los servicios definidos por el usuario. Lo anterior resulta en un proceso que comienza con el establecimiento de una *matriz de estados* y finaliza con la resolución del sistema lineal $\pi * Q = 0$ para la obtención de la distribución estacionaria de probabilidad de la cadena: π . Comencemos resumiendo los pasos que llevan a la obtención de π :

- Determinación de las dimensiones de la matriz de estados.
- Obtención de la matriz de estados completa.
- Obtención del generador infinitesimal Q .
- Resolución del sistema lineal $\pi * Q = 0$.

Describamos con algo de detalle los puntos enumerados. Para eso es necesario definir antes lo que entendemos en este contexto por *matriz de estados*.

Lo primero que debemos aclarar, es que la *matriz de estados* no es en general una matriz. Nosotros abusaremos del lenguaje para referirnos a lo que en realidad es un arreglo multidimensional, con tantas dimensiones como servicios tenga la mezcla definida por el usuario. Por ejemplo, si sólo existe un único servicio en la celda, la *matriz de estados* será simplemente un vector de $N_{max} + 1$ entradas, donde N_{max} es el número máximo de usuarios permitidos en la celda. Del mismo modo, si se tiene dos servicios, se tendrá una verdadera matriz de $N_{1max} \times N_{2max}$, y si se tienen más cantidad de servicios se obtendrá un arreglo multidimensional de enteros, con tantas coordenadas como servicios tenga la celda. Las entradas de la *matriz de estados* se interpretan de modo tal que, para el caso de dos servicios, la entrada de coordenadas $(n_1; n_2)$ representa el estado de la celda en el cual se tiene $(n_1$ usuarios del servicio 1 y n_2 del servicio 2). La entrada correspondiente a dicha coordenada, será un entero distinto de cero en el caso de que ese estado sea posible. Es decir, la celda implementa un control de acceso que limita la cantidad de usuarios que ingresan a la misma, ya que los recursos de radio disponibles son finitos. Entonces el modelo se comporta de modo tal que es posible que la celda pueda estar en los estados $(n_1; 0)$ o $(0; n_2)$, pero puede suceder que no sea posible estar en el estado $(n_1; n_2)$ por no contar con recursos suficientes para esta cantidad y combinación de usuarios. En ese caso la entrada de la *matriz de estados* correspondiente a las coordenadas $(n_1; n_2)$ tendrá almacenado el valor cero, mientras que las entradas $(n_1; 0)$ y $(0; n_2)$ tendrán un valor entero distinto de cero que será además su número de estado. Pasemos ahora a describir los pasos necesarios para hallar π .

Determinación de las dimensiones de la matriz de estados

Primero debemos determinar la dimensión de la *matriz de estados*. Esto implica establecer, para cada servicio de la mezcla, cuántos usuarios máximo de ese servicio se pueden admitir en la celda, teniendo cero usuario de otros servicios. Con lo anterior queda determinado el largo de la *matriz de estados* en cada dimensión del arreglo. Al finalizar este paso contaremos con el *esqueleto* de la *matriz de estados* y podremos empezar a rellenarla.

Obtención de la matriz de estados completa

Una vez finalizado el primer paso, lo que sigue es recorrer de forma ordenada todas las coordenadas de la *matriz de estados*, que al inicio tiene todas

sus entradas en *null*. Cada coordenada del arreglo, es un potencial estado válido de la cadena de Markov. Lo anterior significa que será posible, según el modelo, encontrar en la celda esa combinación de cantidad de usuarios y tipo de servicios. Entonces para cada coordenada se pregunta si ese estado es posible según algún criterio que modele el control de acceso implementado por la celda. Si la respuesta es afirmativa, ese estado será numerado de manera secuencial con un entero: su *número de estado*. Si en cambio el estado es inválido, es decir que no es posible esa combinación de usuarios y servicios en la celda, la entrada se rellena con el valor cero.

Obtención del generador infinitesimal Q

Con la *matriz de estados* completa, pasamos a armar el generador infinitesimal de la cadena. La matriz Q es cuadrada de dimensiones cantidadDeEstados por cantidadDeEstados. La cantidad de estados es el mayor de los enteros utilizados al rellenar la matriz de estados. Para armar Q , lo que se hace entonces es recorrer la *matriz de estados* y si el estado es válido (i.e: la entrada es distinta de cero), se rellenan las entradas correspondientes en la matriz Q con las tasas de arribos y partidas para ese servicio y esa cantidad de usuarios, determinado por el eje y dirección de recorrido de la matriz de estados.

Antes de seguir pongamos de manifiesto algunas particularidades del generador infinitesimal. La matriz Q posee un alto porcentaje de sus entradas en cero. Lo anterior es algo propio de este tipo de matrices que se debe a como se construyen a partir de la determinación de la cadena de Markov. Rápidamente podemos explicar que las entradas que serán distintas de cero, son aquellas entradas (i, j) que se corresponden a una transición del estado i al j . En general, si se puede ir de i a j se podrá también volver de j a i con lo cual si la entrada (i, j) es distinta de cero también lo será la (j, i) . Además por construcción la diagonal de Q es el opuesto de la suma de las otras entradas en la fila correspondiente, por lo que la diagonal también es distinta de cero. Es fácil ver que en general la mayoría de las transiciones entre estados es imposible, es decir, el modelo implica que no se pueda pasar directamente del estado (N_1, N_2) al $(N_1, N_2 + 2)$, por ejemplo, con lo cual la entrada de la matriz Q correspondiente a dicha transición valdrá cero. Lo anterior implica que un alto porcentaje del total de entradas de Q tenga almacenado el valor cero. Si a lo anterior le sumamos que en el caso de una mezcla de cuatro o cinco servicios, Q puede fácilmente llegar a tener una cantidad de entradas del orden de 4×10^{10} (correspondiente a 200000 estados posibles de la celda), entonces es necesario trabajar con matrices *sparse* para el almacenamiento

y operación de Q . Con lo anterior en mente pasemos pues a la resolución numérica de la cadena.

6.4.2. Resolución de $\pi * Q = 0$

Como se vio en la sección anterior, la base de todos los casos de uso es una Cadena de Markov de varias dimensiones, sobre la cual se modelan los arribos de usuarios de los diferentes servicios presentes en la celda. Una de las necesidades es entonces, hallar la distribución estacionaria de probabilidades de la cadena: la distribución π . Para ello se precisa resolver el sistema lineal $\pi * Q = 0$, donde Q es el generador infinitesimal de la cadena. El problema que surge es que, como se vio, Q es una matriz de gran tamaño que contiene muchos ceros. Lo anterior implica, por un lado, la necesidad de usar matrices *sparse* para reducir los requerimientos de memoria para el almacenamiento de Q . Por otro lado supone una ventaja, ya que al contar con tantas entradas en cero, se abre la puerta a encontrar algún método numérico que minimice la cantidad de operaciones³⁹ necesarias para resolver el sistema lineal $\pi * Q = 0$.

Con el objetivo anterior en mente, nuestra primera elección fue utilizar el mismo método numérico que se usó en el *AGG*⁴⁰. Este método implica obtener la *descomposición LU* de Q , lo que a su vez nos lleva a escalarizarla. El hecho de tener que escalarizar una matriz de las características de Q , implica un tiempo de procesamiento considerable sólo por tener que recorrer sus entradas, y además en el proceso muchas de las entradas que originalmente valían cero, pasan a tener un valor distinto de cero, haciendo que la matriz quede *menos sparse* que al principio, provocando mayores tiempos de procesamientos a la hora de operar con la matriz escalarizada. Esto llevó a que cuando se definían, por ejemplo, cuatro servicios en la mezcla, los tiempos de procesamiento necesarios para hallar la distribución π fueran del orden de las 10hs. Lo anterior era inaceptable en sí mismo, pero si además tenemos en cuenta que para algunos casos de uso era necesario iterar hallando varias veces π , las 10hs pasaban fácilmente a 100hs para completar el caso de uso. Este problema para nada menor, hizo necesario que todo el equipo de trabajo pusiera su esfuerzo en encontrar otro método numérico que nos permitiera resolver $\pi * Q = 0$ en un tiempo mucho menor al anterior.

³⁹En este caso entendemos por operaciones a las sumas y productos

⁴⁰Software Analizador de GPRS/GSM desarrollado e implementado durante el convenio previo al de 3G

En [3], se presenta una variedad de métodos numéricos para la resolución de $\pi * Q = 0$. De allí extrajimos el método iterativo conocido como *método de Gauss-Seidel*.

Este algoritmo resultó en una mejora notoria en los tiempos de procesamiento, reduciendo las mencionadas 10hs en la determinación de la distribución estacionaria de probabilidad, a sólo un par de minutos. Esto supuso una mejora de gran importancia para la herramienta producida, ya que permitió la implementación de casos de uso que iteran hallando varias veces π y que demoran a lo sumo media hora en obtener un resultado, pero que de lo contrario hubiesen sido prácticamente inservibles si en vez de 30 minutos tardaran 100hs. Además contribuyó a cumplir uno de los objetivos propuestos para la herramienta de dimensionamiento que era que la misma fuera lo más práctica posible, obteniendo los resultados en tiempos razonables.

6.4.3. Iteraciones

Como se mencionó en el apartado anterior, algunos de los casos de uso requerían iterar para poder arribar a los resultados. Por ejemplo, el caso de uso *Crecimiento Global* (ver sección 4) comienza calculando los bloqueos de los servicios definidos en la mezcla, para valores iniciales en las respectivas tasas de arribos. Luego, en base a los bloqueos obtenidos, se aumentan o disminuyen las tasas de arribo (manteniendo las proporciones entre los servicios) y se calculan nuevamente los bloqueos. Esta iteración se repite hasta que los bloqueos hallados estén en un entorno de los bloqueos máximos admitidos (definidos por el usuario), resultando pues en las tasas de arribos máximas que la celda puede tolerar sin que los bloqueos se tornen inaceptables.

Iteraciones del estilo de la anterior se dan también en otros casos de uso. En todas ellas es necesario calcular varias veces una distribución de probabilidad estacionaria de la cadena de Markov (π). Si bien los tiempos en determinar π fueron reducidos considerablemente, en los peores casos la resolución de la cadena puede llegar a tomar algunos minutos, por lo que si no se tiene cuidado en la elección del algoritmo de iteración, se puede pasar de resolver un caso de uso en diez iteraciones, a resolverlo en cincuenta, agregando minutos de espera indeseables.

Una desventaja a la hora de iterar, es que el sistema visto como *entrada-salida* es de una complejidad tal que hace difícil predecir un comportamiento

a priori. Más aún, la forma cualitativa de la curva que describe *la salida* al variar *la entrada*, cambia según el caso de uso y según el valor de los parámetros de entrada, sobretodo los del perfil de tráfico de los servicios. Por otra parte, las necesidades del software hacen que los requerimientos de precisión en estas iteraciones sea poco exigente. Teniendo en cuenta las dos consideraciones anteriores, se optó por implementar el método de *bipartición*. Este método presenta algunas ventajas. Para empezar, converge seguro si se toman puntos iniciales máximo y mínimo que sean respectivamente mayor y menor al valor final. Lo anterior es una ventaja ya que por lo general se itera variando las tasas de arribo de usuarios.

Estas tasas pueden valer cero en el caso de demanda nula, y eligiendo un valor máximo para la tasa de arribo de 2 usuarios por segundo, o lo que es lo mismo 7200 usuarios en la hora, nos aseguramos que se cubran los casos razonables, sin que ello represente una cantidad excesiva de iteraciones adicionales. Por otra parte es un algoritmo sencillo, fácil de implementar y comprender en el código. Además se comprobó que converge suficientemente rápido alcanzando en los peores casos del orden de 10 iteraciones. Más allá de lo expuesto, no resultaba seguro implementar algoritmos como los de *Newton-Raphson* o el *método de la secante* porque para eso teníamos que saber que la *expresión* con la cual se itera verifica algunas condiciones de pendiente, máximos relativos, etc. y no fue posible caracterizar un comportamiento del sistema en tales términos.

Cantidad de servicios indeterminada

Una de las particularidades de la implementación de la herramienta que en un principio no parecía un problema, es el hecho de que toda la resolución del modelo markoviano depende, entre otras cosas, de la cantidad de servicios. Llegado el momento de la implementación, se hizo necesario escribir un código que se independizara de la cantidad de servicios definidos en la mezcla, ya que a priori no se sabe la cantidad de servicios que el usuario necesita definir. Lo anterior supuso un problema no menor que se resolvió mediante la implementación de una serie de métodos reunidos en una clase denominada *OperIndices*. Esta clase posibilitó el manejo fácil de una cantidad de índices variables a la hora de, por ejemplo, armar y recorrer la *matriz de estados*. Cada índice se corresponde con un servicio de la mezcla definida. La cantidad máxima total de servicios posibles en esta versión del software es de cinco servicios. Este límite se setea casi de forma exclusiva en la clase *OperIndices*, y fue puesto en cinco servicios porque el aumento en la cantidad de estados al pasar a seis servicios es tal, que el procesamiento y el consumo de memoria

hacen que la herramienta o bien no funcione en PC's *domésticos*⁴¹, o bien no sea práctica por lo tiempos implicados en el procesamiento de la cadena. Sin embargo, gracias a la existencia de *OperInices* y a la forma en la que se implementó, la ampliación a mayor cantidad de servicios puede realizarse en un futuro sin problemas; y sin necesidad de cambios radicales en el resto de las clases.

6.5. Problemas planteados en esta etapa

Durante el desarrollo del software se plantearon distintos problemas, destacamos aquí los más importantes y cómo fueron solucionados.

Uso de Memoria

Uno de los primeros desafíos a la hora de desarrollar el modelo, fue el hecho de realizar cálculos con matrices de gran tamaño. El software debe mantener en memoria matrices del orden de 200.000 por 200.000 entradas y realizar cálculos con ellas. Estudiando la forma de las matrices, se observó que todas ellas poseen una cantidad muy grande de entradas con valor cero. Es por esto que se optó por trabajar con matrices sparse. Estas matrices no guardan las entradas que poseen valor cero, por lo cual la cantidad de datos que manejan es mucho menor, disminuyendo considerablemente el uso de memoria. Se utilizó para esto una librería denominada “mtj.jar”, la cual contiene métodos y clases para manejar tanto matrices como vectores sparse.

Tiempo de procesamiento

Otro problema no menos importante que el anterior, fue el tiempo que lleva procesar y realizar cuentas con matrices grandes, y el gran número de iteraciones que se llevan a cabo en distintos puntos del modelo. En particular, uno de los puntos más críticos fue la resolución de la ecuación del modelo markoviano $\pi * Q = 0$. El problema se presentó al escalarizar Q sparse, ya que durante este proceso muchas de las entradas que originalmente eran cero, tomaban un valor diferente, y tanto el tiempo de procesamiento como el uso de memoria aumentaban considerablemente. Para resolver esto se utilizó el método de Gauss-Siedel (ver sección Implementación de algoritmos y métodos numéricos), con lo cual se acertó un tiempo de procesamiento de 10 horas

⁴¹Es común que se obtenga una excepción por memoria insuficiente

(en algunos casos) a tan solo 3 o 4 minutos.

Archivo de configuración y datos por defecto

Otro de los requerimientos importantes del software, fue no tener valores “Hard Code”, todos los parámetros que maneja el modelo se deben poder setear por el usuario a través de la interfaz o en un archivo de configuración. Para esto era necesario manejar (leer) un archivo de configuración con métodos flexibles, y poder tener un archivo “entendible” por el usuario.

Se utilizó para ello unas librerías que ofrece Apache, que permiten leer de forma sencilla desde un archivo de configuración.

7. Validación del software

En esta sección, la idea es verificar la coherencia de los resultados para cada caso de uso. Se partirá de un conjunto de servicios y se modificarán algunos parámetros cuya variación sea coherente con el modelo. La idea no es analizar los resultados ni validarlos contra otro documento o información, ya que esto se dejará para una sección posterior.

Los servicios tomados como referencia los listaremos a continuación, y en el correr de la sección solo mencionaremos los parámetros que variamos.

<i>Parámetros</i>	<i>CS12,2 – CS12,2</i>	<i>CS64 – CS64</i>	<i>PS64 – PS128</i>	<i>PS64 – PS384</i>
Actividad UL	0.5	1.0	0.2	0.2
Actividad DL	0.5	1.0	0.7	0.8
Duración (seg)	75	85	150	350
Tasa arribos	0.2	0.02	0.01	0.005

7.1. Bloqueos R99

Se toma para este caso de uso, la siguiente configuración del sistema: celda solo de R99, trabajando al 50 % de carga en el UpLink, un entorno urbano y una mezcla de servicios *CS12,2 – CS12,2* y *PS64 – PS384*.

¿ Cómo afecta en el bloqueo, la tasa de arribos y la duración de llamada ?

Es de esperarse que un aumento en la tasa de arribos (λ) de un servicio, genere mayor probabilidad de bloqueo del mismo, y en caso de que disminuya el valor, la probabilidad aumente. Para el caso de la duración de la sesión ($1/\mu$), el comportamiento es el mismo (a mayor duración mayor bloqueo). Para verificar que los resultados reflejen esto, se muestra una tabla donde variamos el λ y μ de uno de los servicios en una proporción dada e indicamos las probabilidades de bloqueo.

<i>Servicios</i>	Caso Normal	$\lambda_{CS} (0.5)$	$\lambda_{PS} (0.001)$	$\mu_{PS} (500)$
<i>CS12,2 – CS12,2</i>	$2,9 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-4}$	$7,5 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-3}$
<i>PS64 – PS384</i>	0,008	0,026	$4,2 \times 10^{-6}$	0,03

¿ Cómo afecta en el bloqueo, los factores de actividad ?

El factor de actividad, ya sea UL o DL, esta vinculado con la potencia (ver sección 5), por lo tanto un aumento de estos implicaría permitir menos cantidad de servicios en el modelo. Esto reduciría el tamaño de la matriz de estados y por lo tanto aumentarían los bloqueos. Mostraremos en la siguiente tabla este hecho.

<i>Servicios</i>	Caso Normal	$Act_{UL,DL}(CS, PS) = 1$	$Act_{DL,UL}(PS, CS) = (0.2)$
<i>CS12,2 – CS12,2</i>	$2,9 \times 10^{-4}$	0,003	$1,7 \times 10^{-4}$
<i>PS64 – PS384</i>	0,008	0,044	0,004

¿ Cómo afecta el factor de carga de la celda UL y DL ?

Como se explicó en la sección 5, a mayor factor de carga se permiten ingresar mayor cantidad de usuarios. En el caso del DL, en vez de mostrar el factor de carga, mostraremos la potencia asignada a HSDPA, ya que están vinculados directamente (no se incluirá el servicio HSDPA por ahora). Recordamos que el factor de carga nos determina que tan lejos del polo trabajamos.

<i>Servicios</i>	Caso Normal	$Carga_{UL} = 0,1\%$	$Carga_{UL} = 0,8\%$	$Pot_{HS} = 40\%$
<i>CS12,2 – CS12,2</i>	$2,9 \times 10^{-4}$	0,31	$2,9 \times 10^{-4}$	0,007
<i>PS64 – PS384</i>	0,008	0,007	0,008	0,19

7.2. Crecimiento proporcional

Se utiliza para este caso de uso, la misma configuración que el caso anterior.

Verificar relación entre tasa de arribos y bloqueos

La siguiente tabla muestra la variación de las tasa de arribos máxima (λ) al cambiar el bloqueo objetivo de los servicio CS y PS.

Bloqueos (CS, PS)	(2% y 5%)	(2% y 10%)
$\lambda_{CS12,2-CS12,2}$	0,28	0,34
$\lambda_{PS64-PS384}$	0,007	0,009

7.3. Bloqueos R99 + HSDPA

Se toma para este caso de uso la siguiente configuración del sistema: celda de R99 con 30% de potencia asignada a HSDPA, trabajando al 50% de carga en el UpLink y en un entorno urbano. Trabajaremos con una mezcla de servicios $CS64 - CS64$, $PS64 - PS384$, $HSDPA64$ y $HSDPA384$. Para HSDPA se considerará una tasa de arribos de $\lambda_{HS} = 0,02$. Los servicios de HSDPA con sus respectivos parámetros son:

Parámetros	Actividad UL	Descarga Prom.
$HSDPA64$	0,4	400kbyte
$HSDPA384$	0,8	7,0Mbyte

Se quiere validar que el modelo se comporte adecuadamente si se le agregan servicios HSDPA. El agregado de estos, me influye en el UpLink a través del Eb/No y en el DownLink a través del factor de carga de la celda ((sección 5, página 24)), esto varía la matriz de estados y por ende las probabilidades de bloqueo de R99.

Se muestra en la siguiente tabla este fenómeno:

	Sin Serv. HS	+ $HSDPA64$	+ $HSDPA384$
$\lambda_{CS64-CS64}$	$1,4 \times 10^{-3}$	0,011	0,13
$\lambda_{PS64-PS384}$	$7,6 \times 10^{-3}$	0,079	0,09

Para el agregado de cualquiera de los 2 servicios HSDPA, vemos que el bloqueo de los servicios R99 aumentó.

7.4. Maximizar arribos HSDPA

En este caso se toma los servicios HSDPA definidos anteriormente y se verificará el correcto comportamiento del modelo al variar algunos parámetros.

La celda va a estar configurada al 50 % de carga en el UpLink, un entorno urbano, 40 % de potencia para HSDPA y se asegurará un throughput mínimo de 400 kbps.

Variar la mezcla de servicios

Es de esperarse que cuanto mayor sea el porcentaje en la mezcla del servicio HSDPA con mayor rate, menor sea la cantidad de usuarios en la busy hour que pueden entrar al sistema asegurándoles determinado throughput mínimo. A continuación se muestra una tabla donde se varia esta proporción y se observa los resultados de λ_{HS} obtenidos ($1/NinBH$), verificando también lo mencionado anteriormente (throughput mínimo asegurado).

	HSDPA64	80 %HS64, 20 %HS384	80 %HS64, 20 %HS384	HSDPA384
λ_{HS}	0,38	0,067	0,019	0,015

Variar % de potencia HSDPA y $UEth_{MIN}$

Se analiza el caso anterior para una mezcla de 90 % HSDPA64 y 10 % HSDPA384, en donde se varía la potencia por un lado y el $UEth_{MIN}$ por otro. Lo que sucede es que a mayor potencia, mayor es el $NinBH$ y por otro lado a mayor $UEth_{MIN}$, menor $NinBH$. Podremos concluir el correcto comportamiento del modelo al variar estos parámetros.

	40 %Pot	20 %Pot.	80 %Pot.	$UEth_{MIN} = 100kbps$	$UEth_{MIN} = 800kbps$
λ_{HS}	0,12	$1,0 \times 10^{-4}$	0,55	0,98	$1,0 \times 10^{-4}$

7.5. Arribos respetando R99 y $UEth_{MIN}$ garantizado

Para validar estos dos casos, no nos centraremos en variar algunos parámetros y ver que sean coherentes, ya que como se explicó en la sección (6), estos realizan iteraciones con los dos casos anteriores.

Lo que hicimos fue verificar que si la salida de un caso, la ponemos como entrada del otro, obtenemos la condición de entrada del primero. A modo de ejemplo, si obtenemos la potencia máxima que se le puede asignar a HSDPA, asegurando un throughput mínimo, al poner esta potencia como entrada del otro caso, deberíamos obtener el throughput mínimo que se garantizó en el primero. Esto lo verificaremos para dos casos diferentes.

Caso 1

Se toma el servicio $PS64-PS128$ de R99 y los servicios antes mencionados de HSDPA (90 % HS64 y 10 % HS384). Se trabajará en un entorno urbano y a un factor de carga en el UpLink de 50 %. Primero buscaremos la potencia máxima que se le puede asignar a HSDPA y que λ_{HS} pudimos obtener con esa potencia asegurando un $UTth_{MIN} = 300 \text{ kbps}$. De aquí obtenemos la siguiente tabla:

% Pot. asignada HS	λ_{HS}	Bloqueo R99
5	0.0 (Potencia baja)	$3,5 \times 10^{-6}$
10	0.0 (Potencia baja)	$3,5 \times 10^{-6}$
15	0.0 (Potencia baja)	$3,5 \times 10^{-6}$
20	0.0 (Potencia baja)	$3,5 \times 10^{-6}$
25	0.02	$3,5 \times 10^{-6}$
30	0.046	$3,5 \times 10^{-6}$
35	0.079	$3,5 \times 10^{-6}$
40	0.12	$2,4 \times 10^{-5}$
45	0.16	$1,4 \times 10^{-4}$
50	0.22	$3,5 \times 10^{-3}$
55	0.28	0,014
60	0.36	0,048
65	No satisface R99	0,31

Como se puede observar si tomamos el 60 % de potencia asignada a HSDPA, se obtiene el mejor caso donde el λ_{HS} máximo es 0.36. Ahora si usaremos el otro método con estos valores obtenidos, vemos que el $UTth_{MIN}$ que podemos garantizar es 405 *bkps* comprobando de esta manera que el resultado fue coherente.

Caso 2

Se toman 2 servicios de R99, *PS64 – PS128* y *CS12,2 – CS12,2* y el servicio de HSDPA 384. Se trabajará en un entorno urbano y a un factor de carga en el UpLink de 50 %. Haremos el mismo procedimiento que antes con $UTth_{MIN} = 600$ *bkps*:

% Pot. asignada HS	λ_{HS}	Bloqueo R99 - CS	Bloqueo R99 - PS
5	0.0 (Potencia baja)	$1,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-9}$
10	0.0 (Potencia baja)	$1,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-9}$
15	0.0 (Potencia baja)	$1,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-9}$
20	0.0 (Potencia baja)	$1,0 \times 10^{-9}$	$7,0 \times 10^{-9}$
25	0.0 (Potencia baja)	$7,0 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-7}$
30	0.0 (Potencia baja)	$4,9 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-6}$
35	0.0 (Potencia baja)	$5,9 \times 10^{-4}$	$4,6 \times 10^{-4}$
40	0.003	$3,1 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-3}$
45	0.006	$7,2 \times 10^{-3}$	$6,2 \times 10^{-3}$
50	0.010	0,012	0,015
55	0.014	0,010	0,05
60	0.014	0,007	No satisface

Al correr el siguiente caso de uso, vemos que al 55 % potencia asignada a HSDPA y $\lambda_{HS} = 0,014$, el $UTth_{MIN} = 674$ *bkps* que es un valor muy próximo al inicial.

8. Resultados y análisis

8.1. Celda homogénea: ¿cuántos Erlangs soporta mi celda?

Comenzamos analizando los resultados para una celda homogénea, con un solo servicio presente en la misma. A continuación presentamos una tabla con los servicios que serán analizados:

Servicio	duración(seg)	actividad UL	actividad DL
CS12,2-CS12,2	75	0.5	0.5
CS64-CS64	85	1	1
PS64-PS64	100	0.4	0.8
PS64-PS128	200	0.2	0.8
PS64-PS384	500	0.3	0.6
PS128-PS128	500	0.3	0.6
PS128-PS384	600	0.3	0.6
PS384-PS384	800	0.7	0.9

En primera instancia, variamos el tipo de entorno (Rural, Suburbano, Urbano o Urbano Denso), manteniendo el factor de carga del Uplink fijo en 50%. En la siguiente tabla se observan los Erlangs que se soporta según el entorno:

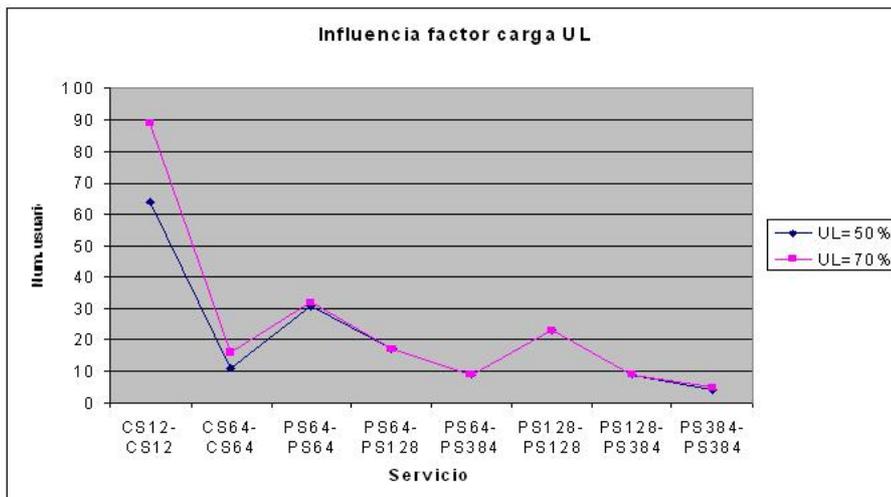
Erlangs por servicio , según entorno:

Servicio	Rural	Suburbano	Urbano	Urbano Denso
CS12,2-CS12,2	24.6	32.8	53.3	43.0
CS64-CS64	2.3	13.9	5.8	3.6
PS64-PS64	12.5	14.3	25.8	21.1
PS64-PS128	5.4	7.0	12.5	17.9
PS64-PS384	2.2	2.2	5.4	7.1
PS128-PS128	7.9	9.8	18.0	14.4
PS128-PS384	2.2	2.2	5.4	7.0
PS384-PS384	0.4	0.4	1.5	0.9

Vemos ahora como varían los Erlangs y el número máximo de usuarios que soporta la celda para cada tipo de servicio, considerando en este caso entorno Urbano y variando el factor de carga del Uplink (se considera una factor de carga de 50 % y 70 %).

Erlangs por servicio y numero máximo de usuarios (entono Urbano)

Servicio	user(UL=0.5)	user(UL=0.7)	Erl(UL=0.5)	Erl (UL=0.7)
CS12,2-CS12,2	64	89	53.3	77.2
CS64-CS64	11	16	5.8	9.8
PS64-PS64	31	32	25.8	26.5
PS64-PS128	17	17	12.5	12.5
PS64-PS384	9	9	5.4	5.4
PS128-PS128	23	23	18.0	18.0
PS128-PS384	9	9	5.4	5.4
PS384-PS384	4	5	1.5	2.2

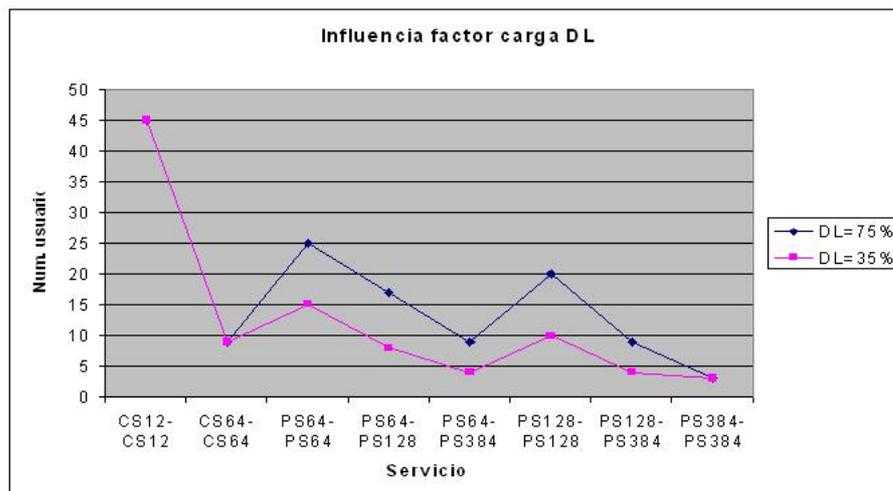


De los resultados obtenidos y de la figura anterior, se desprende claramente que los servicios de CS tienen una gran influencia del Uplink, varía el número de usuarios máximos así como la cantidad de Erlangs al variar el factor de carga del Uplink. Por otra parte los servicios de PS no se ven afectados al cambiar el factor de carga del Uplink entre 50 % y 70 %.

Ahora iremos variando el factor de carga del DownLink, para esto agregamos potencia destinada a HSDPA lo cual influye en el factor de carga del DownLink como se indicó en la sección 5.

Numero máximo de usuarios por servicio, considerando 0% de potencia para HSDPA (Factor de carga DL = 75%) y 40% de potencia para HSDPA (Factor de carga DL = 35%).

Servicio	user(PotHSDPA=0%)	user(PotHSDPA=40%)
CS12,2-CS12,2	45	45
CS64-CS64	9	9
PS64-PS64	25	15
PS64-PS128	17	8
PS64-PS384	9	4
PS128-PS128	20	10
PS128-PS384	9	4
PS384-PS384	3	3



Se puede observar que los servicios de PS tienen una influencia mayor en el Downlink, ya que al variar el factor de carga del Downlink varía el número de usuarios en PS, no así en CS.

8.2. Conjunto de servicios: ¿Necesidad o no de otra portadora?

La idea de esta sección es tratar de responder las siguientes preguntas, dado un conjunto de servicios (R99 y HSDPA) representativo:

- Considerando solamente los servicios de R99, ¿cuáles son los bloqueos de estos servicios?, están por debajo del bloqueo objetivo?.
- En caso que los bloqueos de R99 estén por debajo del requerido, ¿puedo brindar HSDPA?, ¿qué tasa de arribos máxima de HSDPA soporta la celda manteniendo los bloqueos de R99?.
- ¿Cuánto debería crecer HSDPA para tener la necesidad de agregar otra portadora?.

ESCENARIO 1

El conjunto de servicios R99 que se utiliza en este análisis es el siguiente:

Servicio	Arribos	duración(seg)	actividad UL	actividad DL
CS12,2-CS12,2	0.0733	75	0.5	0.5
CS64-CS64	0.0153	85	1	1
PS64-PS128	0.0025	200	0.2	0.8
PS64-PS384	0.001	500	0.3	0.6

Además en esta mezcla consideramos un servicio HSDPA. Realizamos el análisis para la mezcla de servicios R99 con el servicio HSDPA de 128kbps en una primera instancia , y luego consideramos la misma mezcla de servicios R99 pero con el servicio HSDPA de 384kbps en el Uplink.

Rate UL(kbps)	Actividad UL	Archivo descarga(Mbyte)
128	0.6	1
384	0.8	1

Para responder el primer punto debemos calcular los bloqueos de los servicios R99. Incluimos en este análisis, la diferencia entre limitar por falta de códigos o no. En la siguiente tabla se observa para cada servicio, el bloqueo obtenido sin imponer la limitante de códigos (segunda columna) e imponiendo la limitante por códigos (tercer columna).

Servicio	Bloqueo (s/códigos)	Bloqueo (c/códigos)
CS12,2-CS12,2	3×10^{-8}	$1,7 \times 10^{-7}$
CS64-CS64	$2,3 \times 10^{-7}$	$8,7 \times 10^{-7}$
PS64-PS128	$3,7 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-6}$
PS64-PS384	$1,9 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-5}$

Es evidente con los resultados obtenidos, que los bloqueos para todos los servicios R99, se encuentran por debajo del bloqueo objetivo (imponiendo o no la limitante por falta de códigos). Podríamos decir que la celda está “sobrada” en su cuanto a capacidad para el tráfico de R99 esperado.

Pasamos entonces al segundo punto, analizar qué tasa de arribos máxima podemos ofrecer respetando los bloqueos de R99. Para esto, agregamos al conjunto servicios de R99 un servicio HSDPA, e iremos iterando para distintos porcentajes de potencia destinada a HSDPA, hasta encontrar el punto óptimo. Este punto verifica que los servicios de R99 no superan su bloqueo objetivo y además que se da la máxima tasa de arribos HSDPA.

Potencia HSDPA	Arribos HSDPA)	Bloqueo CS	Bloqueo PS
0 %	0	$2,3 \times 10^{-7}$	$1,9 \times 10^{-6}$
5 %	0	$4,4 \times 10^{-7}$	$7,6 \times 10^{-6}$
10 %	0	$1,6 \times 10^{-6}$	$1,7 \times 10^{-5}$
15 %	0	$5,0 \times 10^{-6}$	$8,8 \times 10^{-5}$
20 %	0	$1,9 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-4}$
25 %	0	$5,7 \times 10^{-5}$	$8,8 \times 10^{-4}$
30 %	0	$1,6 \times 10^{-5}$	0.0016
35 %	0.02	$4,3 \times 10^{-4}$	0.0069
40 %	0.045	$1,4 \times 10^{-4}$	0.013
45 %	0.077	0.0036	0.043
50 %	No satisface R99	-	-
60 %	No satisface R99	-	-
70 %	No satisface R99	-	-
80 %	No satisface R99	-	-
90 %	No satisface R99	-	-

Se observa en la tabla que a medida que agregamos potencia para HSDPA aumentan los bloqueos de R99, y lo opuesto sucede con la tasa de arribos HSDPA que aumenta con la potencia. El punto óptimo se encuentra en 45 %

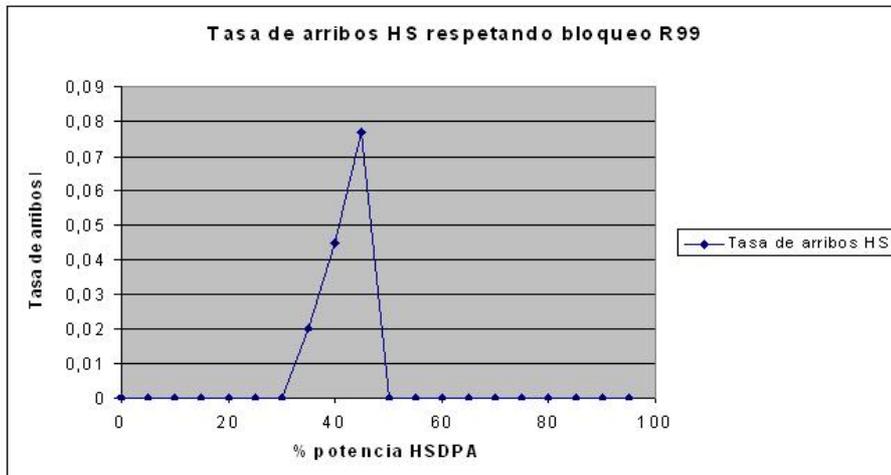


Figura 18: Tasa de arribos HSDPA

de potencia destinada para HSDPA (como se muestra en la figura 18) para la cual la tasa de arribos es de 0.077 , a partir de esa potencia, los bloqueos para los servicios R99 superan su valor objetivo.

Si consideramos en cambio, el servicio HSDPA con una tasa de subida de $384kbps$, vemos que el punto óptimo es el mismo, disminuyendo la tasa de arribos máxima que se puede ofrecer:

Potencia HSDPA	Arribos HSDPA)	Bloqueo CS	Bloqueo PS
0 %	0	$2,3 \times 10^{-7}$	$1,9 \times 10^{-6}$
5 %	0	$4,4 \times 10^{-7}$	$7,6 \times 10^{-6}$
10 %	0	$1,6 \times 10^{-6}$	$1,7 \times 10^{-5}$
15 %	0	$5,0 \times 10^{-6}$	$8,8 \times 10^{-5}$
20 %	0	$1,9 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-4}$
25 %	0	$5,7 \times 10^{-5}$	$8,8 \times 10^{-4}$
30 %	0	$1,6 \times 10^{-5}$	0.0016
35 %	0.02	0.0015	0.007
40 %	0.045	0.003	0.013
45 %	0.068	0.008	0.044
50 %	No satisface R99	-	-
60 %	No satisface R99	-	-
70 %	No satisface R99	-	-
80 %	No satisface R99	-	-
90 %	No satisface R99	-	-

Se deduce en este análisis, que para este setting de servicios se puede aumentar el tráfico de HSDPA hasta una tasa de arribos de 0.068 aproximadamente, sin que los servicios de R99 superen el bloqueo objetivo.

Se considera ahora un segundo escenario, en el cual la tasa de arribos de los servicios involucrados es mayor:

ESCENARIO 2

El conjunto de servicios R99 que se utiliza en este análisis es el siguiente:

Servicio	Arribos	duración(seg)	actividad UL	actividad DL
CS12,2-CS12,2	0.27	75	0.5	0.5
CS64-CS64	0.0235	85	1	1
PS64-PS128	0.01	200	0.2	0.8
PS64-PS384	0.006	500	0.3	0.6

Se mantiene al igual que en el escenario 1, el servicio HSDPA con 128 kbps o 384 kbps en el Uplink. Se comienza entonces analizando nuevamente que sucede con los bloqueos de los servicios de R99 sin presencia de HSDPA en la celda:

Servicio	Bloqueo (s/códigos)	Bloqueo (c/códigos)
CS12,2-CS12,2	0,0026	0,0068
CS64-CS64	0,0155	0,0287
PS64-PS128	0,021	0,0614
PS64-PS384	0,08	0,14

Se observa en la tabla anterior que no se satisface que los bloqueos de R99 estén por debajo del objetivo. Por ejemplo, para CS64-CS64 el bloqueo considerando la limitante por códigos es de 2.8 %, mayor a su bloqueo objetivo del 2 %.

Lo mismo sucede con el servicio PS64-PS384 el cual tiene un bloqueo mayor a su objetivo de 5 % , imponiendo o no imponiendo la limitante por falta códigos.

Por lo tanto, queda claro del resultado anterior, que la celda no esta en condiciones de soportar HSDPA, respetando los bloqueos de R99 por debajo de su objetivo.

En este escenario se ve la necesidad de incluir una segunda portadora, para satisfacer los bloqueos de R99. Ahora, se analiza que sucede si en lugar de ofrecer el servicio de voz sobre 3G, se ofrece el mismo sobre GSM?.

8.3. Voz sobre GSM

En este análisis, sacamos el servicio de Voz (CS12,2-CS12,2) del conjunto de servicios R99 (simulando que el mismo se ofrece sobre la red GSM y no sobre la red 3G). Analizaremos el escenario 2 presentado anteriormente en el cual no se satisfacen los bloqueos para los servicios de R99, es decir que los bloqueos de CS y PS superan el 2 o 5 % respectivamente.

Por lo tanto nuestro conjunto de servicios ahora es el siguiente:

Servicio	Arribos	duración(seg)	actividad UL	actividad DL
CS64-CS64	0.0235	85	1	1
PS64-PS128	0.01	200	0.2	0.8
PS64-PS384	0.006	500	0.3	0.6

Podemos observar que los bloqueos de los servicios R99 han disminuido:

Servicio	Bloqueo (s/códigos)	Bloqueo (c/códigos)
CS64-CS64	0.01	0.013
PS64-PS128	0.012	0.0275
PS64-PS384	0.034	0.066

Sin embargo, si se agrega HSDPA en la celda y se analiza la tasa de arribos máxima que se puede brindar, se observa en la siguiente tabla que la celda no soporta HSDPA manteniendo los bloqueos de R99 por debajo del mínimo:

Potencia HSDPA	Arribos HSDPA)	Bloqueo CS	Bloqueo PS
0%	0	0.028	0.037
5%	No satisface R99	-	-

Sin asignar potencia a HSDPA (0%) pero considerando un servicio HSDPA (no importa si éste es de 128 kbps o 384 kbps), el bloqueo de los servicios supera por poco el objetivo.

Si se considera un bloqueo objetivo un tanto mayor (3% para CS y 6% para PS), se observa que se respetan los bloqueos de R99 hasta un 10% de potencia destinada a HSDPA, pero no se soporta una tasa de arribos de HSDPA mayor a 0 para esos porcentajes de potencia.

Potencia HSDPA	Arribos HSDPA)	Bloqueo CS	Bloqueo PS
0%	0	0.028	0.037
5%	0	0.010	0.051
10%	0	0.015	0.064

8.4. ¿Limitante por CEM o por potencia?

Se analiza para el escenario 2, si el bloqueo es mayor por potencia o por Channel Elements. Cabe mencionar que el bloqueo por CEM se realiza por radio base lo cual incluye 3 sectores, mientras que el bloqueo por potencia se realiza por sector. Como los arribos considerados en el escenario 2, representan una celda muy cargada consideramos para el bloqueo por CEM, 2 sectores iguales con arribos iguales a los considerados para el caso de potencia, y 1 sector sin arribos. En total la radio base tiene 128 CE, de los cuales 14 de ellos son destinados a los canales de control.

Servicio	Bloqueo Potencia	Bloqueo CEM
CS12-CS12	0.0026	$3,9 \times 10^{-4}$
CS64-CS64	0.0159	0.002
PS64-PS128	0.021	0.002
PS64-PS384	0.08	0.007

De la tabla anterior se concluye que la limitante en este caso es la potencia y no el hardware (o la cantidad de Channel Elements).

Veamos ahora otro conjunto de servicios:

Servicio	Arribos	duración(seg)	actividad UL	actividad DL
CS12-CS12	0.17	75	0.5	0.5
PS64-PS64	0.08	100	0.4	0.7
PS128-PS128	0.01	200	0.3	0.8

Para esta mezcla de servicios, consideramos los 3 sectores de la radio base con el mismo perfil de tráfico (mismos arribos en los 3 sectores). Vemos en la siguiente tabla el bloqueo por potencia y el bloqueo por CEM teniendo en la radio base una placa de 128 CE, y otro caso en el que se tiene 128+64 CE.

Servicio	Bloqueo Potencia	Bloqueo CEM (128)	Bloqueo CEM (192)
CS12-CS12	0.018	0.058	0.0015
PS64-PS64	0.069	0.22	0.007
PS64-PS384	0.074	0.42	0.017

Vemos en este caso que se produce un bloqueo mucho mayor por falta de CE que por potencia si tenemos una sola placa de 128 CE. Sin embargo si agregamos una placa más de 64 CE, el bloqueo por CE se hace menor al bloqueo por potencia.

8.5. HSDPA: elefantes vs ratones

En esta sección se analiza las diferencias en los parámetros de salida del modelo, si consideramos como servicio HSDPA usuario que descargan por ejemplo páginas web (a los cuales denominamos “ratones”) y usuarios que transfieren un archivo de tamaño considerable (a los cuales denominamos “elefantes”).

Los servicios HSDPA a comparar serán:

Servicio	Rate UL(kbps)	Actividad UL	Archivo descarga(kbyte)
HSDPA64	64	0.3	720
HSDPA384	384	0.8	6000

El primer paso será responder la pregunta: teniendo solo 1 servicio HSDPA en la celda, ¿qué throughput promedio por usuario podemos esperar? ¿Cuál es el throughput de la celda?, y ¿cuál es el número máximo de usuarios?.

Para realizar este análisis, se considera una celda con potencia fija destinada a HSDPA (40 % de potencia) y se desea asegurar 600 kbps a los usuarios HSDPA.

	HSDPA64	HSDPA384
Arribos máximos	0.063	0.007
Número máximo de usuarios	20	3
Throughput por UE(kbps)	277	264
Throughput celda(kbps)	364	331

La tasa de arribos máxima para HSDPA64 (ratones) es mucho mayor a la tasa de arribos máxima de HSDPA384 (elefantes). Esto obviamente se debe, a que los usuarios HSDPA64 realizan su descarga rápido y se van, mientras que los usuarios HSDPA384 permanecen mayor tiempo descargando y por ende la tasa de arribos máxima es menor. Con respecto al número máximo de usuarios instantáneos, es claro para el caso de ratones que la celda esta “sobrada” ya que se pueden soportar hasta 20 usuarios simultáneos (este valor límite esta dado por el despachador de paquetes). Mientras tanto para los usuarios HSDPA384, solamente se soportan un máximo de 3 simultáneos.

En media el número de usuarios simultáneos en ambos casos es 0.6, esto se debe a que los “ratones” llegan y se van de forma rápida, por lo cual en media siempre hay o 1 usuario o ninguno descargando. Lo mismo sucede con los usuarios HSDPA384, que demoran más en descargar, pero que arriban con una tasa mucho menor. Es por esto que el throughput promedio por usuario es prácticamente el mismo en ambos casos. Este valor depende de la cantidad de usuarios instantáneos y la potencia destinada a HSDPA (que fija el single user throughput), y como en ambos casos la potencia es la misma y el número de usuarios instantáneos también tenemos un throughput por UE y un throughput de la Celda muy parecido.

Analicemos ahora los bloqueos de R99 con un 40 % de potencia para HSDPA. En un primer caso el conjunto de servicios se compone de 3 servicios R99, el servicio HSDPA64 y el servicio HSDPA384. En una primera instancia consideramos un 80 % de usuarios HSDPA64 y un 20 % de usuarios HSDPA384

(segunda columna). En el segundo caso (tercer columna) tenemos 20 % de usuarios HSDPA64 y 80 % de usuarios HSDPA384.

Servicio	Bloqueos(80,20)	Bloqueos(20,80)
CS64-CS64	$4,9 \times 10^{-4}$	$4,6 \times 10^{-3}$
PS64-PS128	$3,8 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-3}$
PS64-PS384	0.01	0.014
HSDPA64	$3,8 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-3}$
HSDPA384	0.007	0.078

De la tabla anterior se desprende claramente que el bloqueo sube en 1 orden (se multiplica por 10) entre la mezcla con 80 % ratones y 20 % elefantes y el caso contrario.

9. Perspectivas del software a futuro

En esta sección se presenta una serie de propuestas de mejora del software. Las mismas serían llevadas a cabo por otro equipo de trabajo, pero es nuestra intención dar una idea de por qué serían mejoras, y cómo habría que implementarlas.

Las tres grandes mejoras que a nuestro juicio ampliarían las posibilidades del software son:

1. Implementación del dimensionamiento de la celda contemplando la presencia en la misma de HSUPA.
2. Implementación de un modelo alternativo para el corte por potencia, que dado una mezcla de servicios y la correspondiente cantidad de usuarios de cada uno, estime la potencia transmitida tanto en el UL como en el DL.
3. Implementación de un simulador que permita obtener el *single user throughput* (UE_{th1}) y el vector $MUG(n)$ de ganancia por multiplexado en el *scheduling* HSDPA, tales como fueron definidos en la sección *Modelado* del presente documento.

En lo que sigue ampliaremos cada punto de los anteriores, explicando por qué representaría una mejora, y cómo entendemos que se podría implementar.

9.1. Dimensionamiento en HSUPA

High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) está especificada por el 3GPP en su Release 6, y es una tecnología que complementa a HSDPA en el acceso de paquetes.

Esta tecnología representa para los operadores de telefonía celular, el paso siguiente a la implementación de HSDPA. Por lo tanto, será cuestión de tiempo para que quienes utilicen la herramienta implementada por este grupo de trabajo, necesiten contar con la implementación de HSUPA. Lo anterior hace necesario proveer una idea sobre cómo se podría lograr lo anterior,

partiendo de lo que ya se tiene. Antes de poder explicar el modelo, y cómo debería integrarse al software, es necesario hacer una pequeña introducción a HSUPA, que remarque sus principales características.

9.1.1. Introducción a HSUPA

En [2] se puede ampliar sobre este tema. De allí se extrajeron los principales conceptos de HSUPA, que proveen las bases para su modelado.

Comencemos diciendo que si bien uno podría esperar una gran similitud entre HSDPA y HSUPA, en realidad HSUPA es más parecido a R99. Lo anterior se hará notorio a medida que avancemos. HSUPA se utiliza como acceso *best effort* de paquetes en el UL. El recurso primordial es entonces la potencia de transmisión de los usuarios HSUPA, que se volcará a la ya presente en la celda, aumentando así el nivel de interferencia en la misma. Entonces lo que se comparte en HSUPA es la cantidad de potencia extra que la celda tolera en el UL. Dicha potencia remanente, se reparte de forma equitativa entre todos los usuarios HSUPA presentes en la celda. De esta manera, cuanto mayor potencia haya disponible por usuario HSUPA, mayor será el ancho de banda de subida que se le podrá brindar a cada uno. Dicho de otro modo, a mayor potencia remanente, de mayor capacidad serán los RAB's de subida que se podrán abrir para cada usuario HSUPA.

Al igual que HSDPA, HSUPA cuenta con un agente encargado del *scheduling* en el Nodo B. Sin embargo, el *scheduler* es bastante más sencillo que el de HSDPA, y sólo se limita a dos tareas: decidir si se admite o no un nuevo usuario HSUPA; y re-asignar la potencia disponible entre los usuarios HSUPA. Básicamente, cuando un usuario HSUPA solicita el ingreso a la celda, el scheduler se fija si la potencia en el UL alcanza para un usuario más, y en función de eso permite o no su acceso. En caso de permitir la entrada de un nuevo usuario, deberá volver a asignar de manera equitativa, la potencia disponible entre la nueva cantidad de usuarios HSUPA. También deberá re-asignar las potencias HSUPA a medida que se ocupen o liberen recursos de UL en R99.

Si bien existen algunas diferencias sutiles entre un usuario de HSUPA y un usuario de datos de R99⁴², en nuestro caso es posible simplificar esas

⁴²ver HSDPA/HSUPA FOR UMTS [2]

diferencias y ver a un servicio HSUPA, como un servicio de datos de R99 *variable*. Esto último quiere decir que cuando los recursos del UL de la celda abundan, un usuario HSUPA obtendrá el RAB más grande de datos de R99, pero si esos recursos se agotan, el RAB de ese usuario será degradado al más pequeño.

Con la idea anterior en mente, pasemos a explicar el modelo adoptado para los servicios HSUPA.

9.1.2. Modelado del servicio HSUPA

El comportamiento particular de HSUPA que queremos modelar es el siguiente. Cuando arriba un usuario HSUPA, hay que decidir si la potencia de UL es tal que es posible dejarlo entrar. Si no se puede, entonces se bloquea su acceso. En caso contrario, hay que determinar si ese nuevo usuario puede ingresar con un RAB de subida igual al que poseen el resto de los usuarios HSUPA que ya esta en la celda, o es necesario degradar el RAB de todos los usuarios HSUPA para *hacer lugar* a uno nuevo.

A nuestro entender, si podemos reflejar el comportamiento descrito arriba, estaríamos teniendo un buen modelo de la dinámica de los servicios HSUPA, y el impacto de éstos en la utilización de los recursos de radio de la celda. Dado que nuestro modelo de servicio es a nivel de RAB, y que la diferencias entre HSUPA y R99 (más allá del carácter *best effort* de HSUPA) se da en otros niveles, modelaremos el servicio HSUPA como un servicio R99 cuyo RAB de subida depende de la potencia disponible en el UL.

Entonces, como el rate de los servicios HSUPA será variable (porque variará en forma dinámica el RAB que se asigne a los usuarios) se modelará de manera análoga a lo explicado para HSDPA, considerando distintos tipos de usuario HSUPA (*peer2peer*, *web*, etc.). Lo anterior implica separar en *servicios HSUPA*, cada uno de los cuales contará con un atributo *TamDescarga*⁴³ que será la cantidad promedio de bits subidos en la hora pico por dicho tipo de usuario (o servicio) HSUPA.

Para entender bien el modelo, hay que tener presente cómo se utiliza la generalización del modelo Npole para varios servicios explicado en la sec-

⁴³En realidad debería llamarse TamañoCarga ya que los datos van en la dirección UE - radio base

ción 5. Basándonos en lo anterior, construiremos una explicación de forma progresiva partiendo del caso más sencillo.

Sólo existe HSUPA en la celda

Empecemos suponiendo que sólo hay HSUPA en la celda. Más aún, supondremos que el comportamiento de los todos los usuarios es el mismo, por lo cual consideraremos un único tipo de servicio HSUPA en la celda. Bajo esta hipótesis, podemos usar la expresión N_{pole} para un solo servicio, para determinar cuántos usuarios HSUPA es posible admitir en la celda, y además con qué RAB estarían presentes. El procedimiento es el siguiente:

1. Suponemos que los usuarios que puedan entrar, tendrán el RAB más grande de R99. Para fijar ideas tomemos 384Kbps. Entonces el factor de actividad de estos usuarios se toma como $\frac{T_{amDescarga_{Kbits}}}{384Kbps \cdot 3600s}$ que representa el porcentaje de tiempo de la hora pico, que le tomaría a un usuario completar la subida de datos a 384Kbps. Entonces ya contamos con todo lo necesario para hallar N_{pole} para un servicio de las características mencionadas. Luego, la cantidad máxima de usuarios HSUPA que podrían ingresar con un RAB de 384Kbps esta dada por: $N_{HSUPA_{max384}} = N_{pole} \cdot ULoad_{tot}$ donde $ULoad_{tot}$ es el factor de carga de la celda en el UL.
2. Se repite el procedimiento anterior, pero esta vez suponiendo que los usuarios HSUPA tendrán adjudicado el RAB menor que le sigue al de 384Kbps: el de 128Kbps. De esa manera se obtendrá $N_{HSUPA_{max128}}$.
3. Repitiendo lo anterior para todos los RAB's posibles, se obtendrá un conjunto $\{N_{HSUPA_{max384}}, N_{HSUPA_{max128}}, N_{HSUPA_{max64}}\}$ en donde $N_{HSUPA_{max384}} < N_{HSUPA_{max128}} < N_{HSUPA_{max64}}$.

De esta manera obtenemos una descripción de la dinámica de la celda en presencia de un servicio HSUPA que determina una cadena de Markov como la de la siguiente figura. Allí se observa que a medida que se van agotando los recursos, los usuarios HSUPA tienen un RAB más pequeño, lo que se traduce en mayores tiempos de permanencia en el sistema.

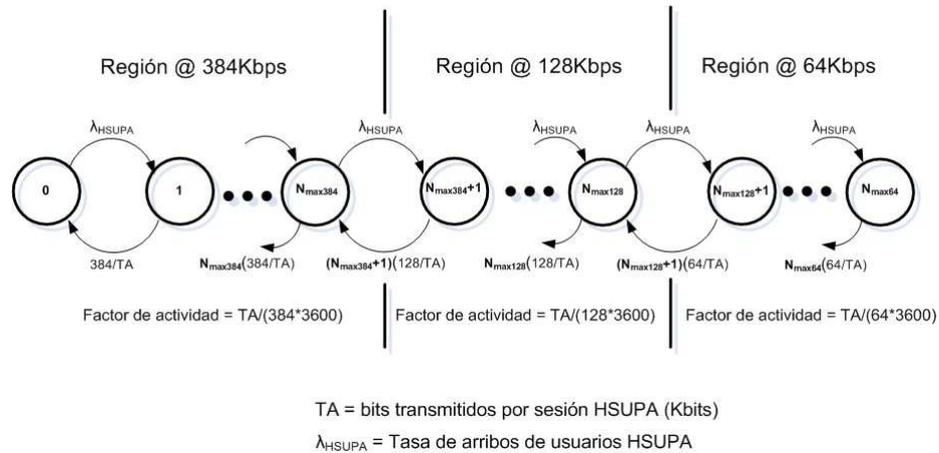


Figura 19: Cadena para un servicio HSUPA de tamaño de archivo subido TA Kbits

HSUPA en presencia de otros servicio

Veamos ahora cómo generalizar lo explicado en la sección anterior, cuando agregamos la presencia de servicios R99 en la celda.

La generalización se realiza de forma inmediata al considerar la expresión Npole para varios servicios. De esta manera, si tenemos una mezcla de k servicios R99 dada por la cantidad de usuarios de cada uno $\{N_1, \dots, N_k\}$, al sustituir en la expresión de Npole para varios servicios los parámetros de los servicios R99, lo que resulta es una función Npole que sólo depende del servicio HSUPA (RAB, factor de actividad, SIR mínimo, etc.). Entonces estamos en condiciones de realizar el procedimiento visto en la sección anterior, en donde se determinan cuántos usuarios HSUPA acepta el sistema según el modelo Npole de potencia, para los diferentes RAB's posibles en HSUPA.

En resumen:

$$\begin{aligned}
 N_{POLE}(N_1, \dots, N_k, N_{HSUPA}) |_{N_1, \dots, N_k} &= N_{POLE}(N_{HSUPA}) \\
 &\Rightarrow \{N_{HSUPA_max384}, N_{HSUPA_max128}, N_{HSUPA_max64}\}
 \end{aligned}$$

La figura 20, ilustra cualitativamente una cadena de Markov que modela una celda con un servicio HSDPA y el servicio de voz de R99.

Obsérvese que a medida que ingresan usuarios de voz al sistema, los recursos para HSUPA disminuyen, llegando un punto a partir del cual los pocos

usuarios admitidos podrán subir datos con el RAB más pequeño disponible. Además, en esa situación los usuarios tienen un tiempo de permanencia mayor.

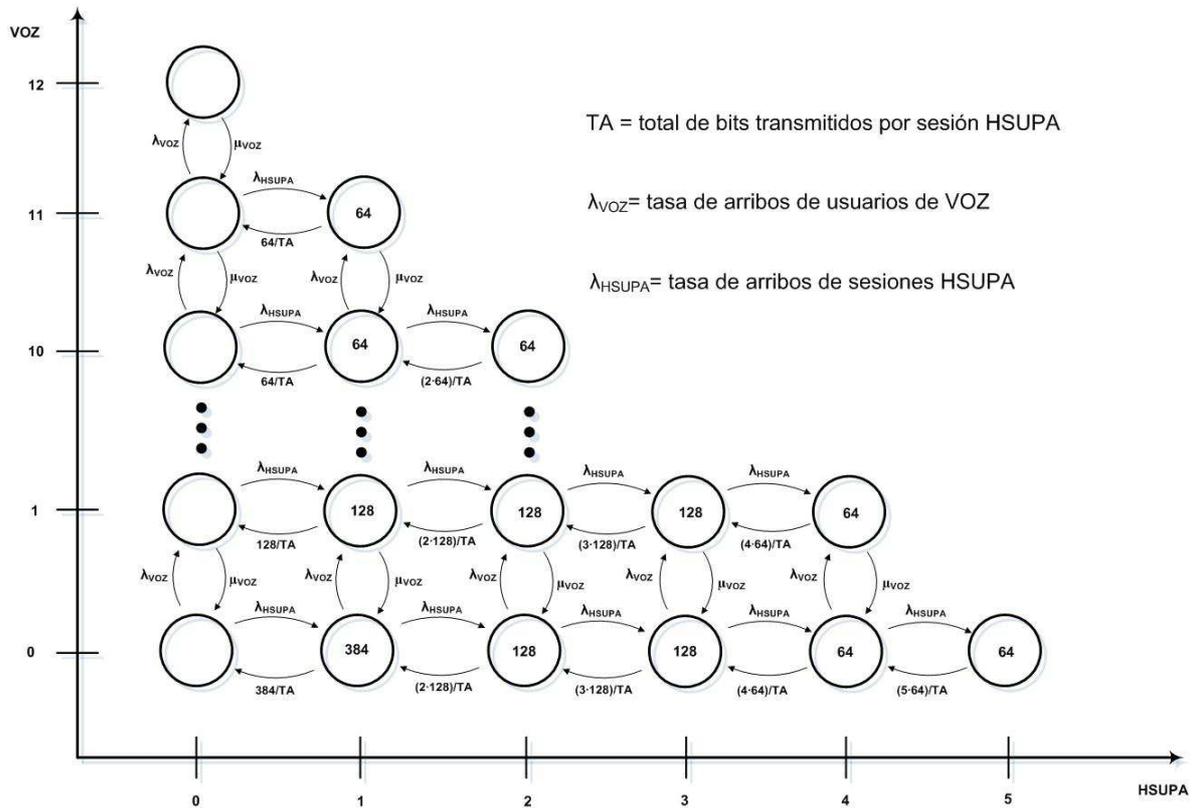


Figura 20: Cadena para una mezcla de HSUPA y VoZ

Caso general: mezcla con más de un servicio HSUPA

Para completar el modelo de HSUPA, pensemos en la situación en la que el usuario de la herramienta de dimensionamiento define más de un tipo de servicio HSUPA. En ese caso la definición del servicio sería análoga a lo explicado para HSDPA. Los parámetros particulares del servicio HSUPA se listan en el cuadro a continuación. El resto de los parámetros que están asociados al RAB, quedan definidos con los servicios R99 (según el perfil de QoS y las recomendaciones del 3GPP), como lo es el *SIR* mínimo por RAB.

Parámetros de servicio HSDPA

Parámetros	Descripción	Qué lo define
γ	% sobre el total ⁴⁴ del tráfico HSUPA	Perfil de tráfico
TamArchivoDesc	Bits subidos por sesión	Perfil de tráfico del servicio

Entonces, si se define más de un servicio HSUPA, se deberá utilizar el procedimiento descrito en la sección anterior, y de esa manera determinar para cada combinación posible de usuarios R99, la cantidad de usuarios HSUPA admisibles y sus respectivos RAB's. Entonces la matriz de estados deberá tener en cuenta, dado una mezcla particular de usuarios R99, que la suma de los usuarios HSUPA de los diferentes servicios definidos, no supere la cantidad antes hallada. La siguiente figura ilustra lo anterior. Si al ejemplo de la sección previa le agregamos un servicio más de HSUPA, la cadena de Markov será de tres dimensiones, por lo cuál no la podemos representar. En cambio podemos poner en un *plano* las diferentes combinaciones posibles de usuarios HSUPA de uno y otro tipo, cuando no hay usuarios de voz presentes en el sistema. Observe que la cantidad de usuarios simultáneos de HSUPA de un determinado RAB es constante. Con lo visto se tiene una idea bastante com-

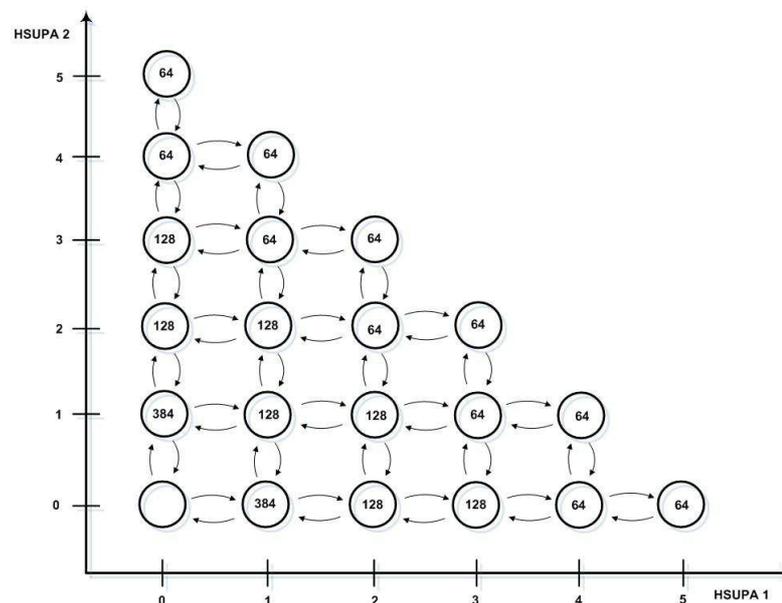


Figura 21: Cadena para una mezcla de dos servicios HSUPA

pleta de cómo modelar la presencia de servicios HSUPA en la celda. Algunas cosas que quedan a determinar en el futuro son, si la bajada de usuarios

HSUPA estará dada por HSDPA, o un RAB similar al del UL. También deberá determinarse un parámetro que ajuste el SIR_{min} de cada servicio R99 debido a la adición de canales de control de HSUPA. Por otra parte si bien a priori el modelo presentado aquí nos parece razonable según lo visto en [2], es necesario implementarlo y analizar los resultados obtenidos, para recién después poder emitir un juicio de valor acerca de la utilidad del modelo para el dimensionamiento de HSUPA. Con lo anterior en mente, la siguiente sección pretende dar una idea de cómo modificar el software presentado en este documento para poder implementar HSUPA con el modelo propuesto.

9.1.3. ¿Cómo agregar HSUPA al *GGG Dimensioning Tool*?

El servicio HSUPA

Según las consideraciones mencionadas anteriormente, el servicio HSUPA se modelará de la siguiente manera:

- . $Rate_{UL}$. Se necesitará fijar un RAB mínimo a garantizar en el uplink. Este parámetro es necesario para la fórmula de Npole, y así poder definir la matriz de estados (ver sección 5). Por ejemplo, si se define 128kbps, los estados válidos serán aquellos en que el usuario pueda tener un RAB 128kbps o mayor.
- . $TamDescarga$. El servicio deberá tener asociado un tamaño de archivo medio a subir por cada sesión de usuario HSUPA.

Este parámetro y el $Rate_{UL}$, definen la duración de la sesión de un usuario HSUPA: $\frac{1}{\mu} = \frac{TamDescarga}{Rate_{UL}}$ en cada punto de la matriz de estados (esto es porque el rate alcanzado depende del estado de la celda).

Para obtener la actividad en el uplink del servicio HSUPA, se sugiere tomar lo siguiente:

$$Act_{UL} = \frac{TamDescarga}{3600 \cdot Rate_{UL}}$$

- . λ . Cantidad de arribos del servicio HSUPA en la busy hour.
- . Para el downlink, en principio la limitante se puede considerar la máxima cantidad de usuarios simultáneos que pueda

soportar el Nodo B.

Con esto es posible crear una clase HSUPA que *herede* de Servicio (ver sección 6), siendo de esta manera HSUPA un servicio más en la mezcla.

Para fijar ideas consideraremos sólo un tipo de servicio HSUPA, pero la generalización a más servicios se realizaría de forma análoga.

Creación de la matriz de estados

Para la determinación de la cadena de Markov, se recorren los estados⁴⁵ posibles y se determina con el criterio dado por el modelo Npole, si dicho punto es válido o no. Entonces, lo único que se deberá modificar al agregar HSUPA, es la condición de si el estado es válido o no. Para esto se tendrán que implementar los siguientes métodos.

Es válido por HSUPA

Para tomar en cuenta como afecta el downlink, se tendrá que agregar un método que determine si la cantidad de usuarios HSUPA es menor de lo que soporta el scheduling. Sería buena idea juntar este método con el *es válido* de HSDPA ya que la lógica sería la misma.

Es válido por Npole

Lo primero a tener en cuenta, es que si un estado con usuarios HSUPA de RAB 384Kbps es válido por Npole, entonces lo será si el RAB es menor. Por lo tanto, a la hora de preguntar si es válido, se podrá asumir en la fórmula de Npole que el $Rate_{UL}$ es el mínimo que se haya configurado en el servicio. Entonces, realizando de forma adecuada los métodos *getRate* y *getActividad* del servicio HSUPA (ver 9.1.3), no se tendría que modificar el método *es válido por Npole*.

⁴⁵Un estado me indica la cantidad de usuarios de cada servicio que hay en determinado instante.

¿Cómo resolver el modelo de Markov con HSUPA?

Como se explicó en la sección 5, una vez obtenida la matriz de posibles estados, lo que queda es determinar el generador infinitesimal de la cadena con λ y μ . El parámetro λ viene configurado con el servicio, pero μ depende no solo de la configuración, sino que del estado en donde se está en la matriz (ver figura 20). Por lo tanto, lo único que se tiene que modificar en el software es el método *getMu*.

El método *getMu*, hoy diferencia si el servicio es R99 o HSDPA y devuelve el μ en cada caso realizando las operaciones pertinentes. Se debería agregar la posibilidad de que el servicio sea HSUPA y generar un *getMu* particular a este servicio. Este método necesitaría una función que devuelva el rate dependiendo del estado en que se está. Lo anterior se podría hacer de la siguiente manera:

- Mediante el criterio de Npole se determina para ese estado, cuál es el máximo rate ($Rate_{max}$) que se le puede asignar a HSUPA.
- Con el rate anterior, el μ ⁴⁶ se calcula así:

$$\mu = N_{HSUPA} \cdot \frac{Rate_{max}}{TamDescarga}$$

9.2. Modelo potencia en un punto

Otro punto interesante para implementar en el futuro, es el modelo de *potencia en un punto* que se describe a continuación.

La idea es evaluar la potencia que consumen el conjunto de usuarios en cada punto de la cadena tanto para el Uplink como para el Downlink. Por ejemplo, si suponemos un estado de la cadena que representa N usuarios de voz y M usuarios de Video-llamada, entonces la idea es calcular la potencia que consumen estos $N + M$ usuarios. En base a esta potencia y la potencia total de la celda, podemos despejar la potencia libre para HSDPA y para HSUPA. Esto posibilitaría reforzar el modelo Npole, verificando por ejemplo,

⁴⁶Inverso del tiempo medio de duración de una sesión HSUPA

que en cada punto de la matriz la potencia demandada a cada UE no supere la potencia máxima de transmisión de los mismos.

Sin embargo creemos que profundizando en este aspecto, se puede llegar a resultados interesantes que pueden compararse con el modelo actual implementado, así como proponer modelos y criterio alternativos para la determinación de la cadena de Markov del sistema.

9.3. Simulación para obtener *MUG* y *UEth1*

Para incluir HSDPA en el análisis, fue necesario definir como entrada al modelo dos parámetros: ganancia por multiplexado (*MUG*) y Single User Throughput (*UEth1*). Estos parámetros se obtienen mediante medición en una celda real, o de manera más práctica mediante simulaciones.

Entonces, sería de interés que el software contara con un módulo que tenga como entradas la potencia y códigos asignados a HSDPA, y devuelva el *MUG* y el *UEth1*.

Para implementar dicho simulador, una alternativa es utilizar la expresión para el *CQI*⁴⁷ dada en [1], y utilizar las tablas brindadas en [9] por la 3GPP, en las que se mapean ese *CQI* en un bloque de transporte de datos a ser enviados al UE. De esta manera es posible simular el scheduling HSDPA, simulando para una cantidad suficiente de TTI's⁴⁸ el valor de *CQI* de cada UE en cada intervalo de tiempo. Luego, con un criterio de agendado, como podría ser el algoritmo *PFS*⁴⁹ descrito en [2], se puede obtener para cada TTI cuántos bits y a qué UE se transmiten. Entonces obtendríamos el throughput de cada usuario de la simulación, y por ende el de la celda. Lo anterior permitiría hallar el *UEth1* y el *MUG*(*n*).

Mencionemos aquí, que nosotros implementamos una versión sencilla de este simulador para generar los parámetros mencionados de entrada al modelo. Sin embargo creemos que dicha implementación no fue lo suficientemente precisa como para dejarla en una versión definitiva. Esa falta de precisión viene por el hecho de que la expresión para el *CQI* dada por Nortel, no contempla efectos de propagación tales como el *fast fading* y *slow fading* ex-

⁴⁷Channel Quality Indicator

⁴⁸Trasmission Time Interval

⁴⁹Proportional Fair Scheduling

perimentados por un móvil. . Estos fenómenos hacen que la calidad del enlace de radio varíe en cada TTI, y por tanto el *CQI* reportado al Nodo B por el terminal. En nuestra simulación los *CQI* no variaban lo suficiente como para reproducir de manera aceptable la dinámica real de agendado de recursos, por lo cual el algoritmo de scheduling asignaba siempre el mismo throughput instantáneo (determinado por el tamaño del bloque de transporte dado por las tablas del 3GPP para cada *CQI*).

Sin embargo creemos que esa simulación puede mejorar notoriamente sólo con modificar la expresión para el *CQI* haciendo que la misma contemple efectos de propagación que hagan variar dicho indicador de manera similar a lo que ocurre en la realidad.

10. Conclusiones

Desde el inicio, este proyecto nos pareció un desafío interesante ya que involucraba una tecnología nueva en el área de telecomunicaciones. Por otro lado, el objetivo a priori se presentó de una manera difusa, ya que al proponerse la implementación de una herramienta de dimensionamiento de una celda 3G, no sólo no estaba claro cómo llegar al objetivo, sino que además ni siquiera sabíamos con certeza qué era una herramienta de ese tipo. Lo anterior revistió a esta experiencia de fin de carrera, con la particularidad de ser un proyecto muy similar al ejercicio profesional. Nuestro cliente fue un operador de telecomunicaciones (ANTEL), y se trabajó conjuntamente con el personal de dicho operador, intercambiando documentación, ideas, conocimientos y realizando reuniones semanales para aprender la nueva tecnología, y definir el alcance del proyecto. Además, tuvimos la oportunidad de presenciar los problemas que enfrenta un operador a la hora de desplegar una nueva red.

Creemos que se alcanzó el objetivo planteado, ya que se pudo implementar una herramienta útil para el dimensionamiento de una celda 3G, cumpliendo con los plazos y los requerimientos establecidos por el cliente.

En cuanto a la experiencia académica, el proyecto ha sido muy enriquecedor ya que nos obligó a utilizar conceptos de varias áreas de la ingeniería, que han sido vistos durante la carrera. Se trabajó en el análisis y modelado de una red de telecomunicaciones, se incursionó en temas tales como cadenas de Markov, métodos numéricos, desarrollo de software y análisis de performance de redes, combinándolos para resolver el problema.

Otro elemento que queremos destacar, es el estudio previo realizado para entender los conceptos nuevos que abarca 3G, lo cual llevo un tiempo considerable. Ese tiempo no sólo se precisó para conocer con relativa profundidad el funcionamiento de 3G (WCDMA, R99, HSDPA), sino que además debimos familiarizarnos con aspectos prácticos como ser qué tipo de servicios se brindan, qué valores numéricos razonables debíamos esperar en cuanto a probabilidad de bloqueo, usuarios servidos en la hora pico, etc.

Por último queríamos destacar el trabajo en equipo, el cual fue un elemento fundamental para poder desarrollar la herramienta. Los tres integrantes del grupo trabajamos a la par, aportando en todas las áreas del proyecto de manera homogénea y en armonía.

11. Agradecimientos

Queremos agradecer a:

Nuestras familias, Carolina Maneiro, Dalia Artenstein, Natalia Etchemendy, amigos, Pablo Belzarena, Laura Aspirot, Andrés Ferragut, Natalia Pignataro, Nicolás de Leon, a los integrantes del convenio, a las galletitas Chiquilín y a todos aquellos que de una manera u otra aportaron en este proyecto.

12. Anexo A: Manual de usuario

En esta sección se describe cómo utilizar el software para calcular los distintos casos de uso. Comenzamos viendo los datos necesarios de configuración.

Instalación

Para instalar el software, descomprimir el contenido del archivo *GGG.rar* en la carpeta deseada. Se copiarán los archivos *3G_DimensioningTool.jar*, *config.properties* y *GGG.exe*. Al ejecutar el archivo *GGG*, el mismo ejecuta el *.jar* quien a su vez levanta la configuración desde el *config.properties*.

Archivo de configuración

El archivo **config.properties** contiene todos los parámetros por defecto que levanta el software. Este archivo es editable, por lo que el usuario puede cambiar los valores que allí aparecen. Un punto importante, es que no se debe cambiar el nombre de los parámetros, sino solamente su valor. A modo de ejemplo aquí presentamos una de las líneas que aparecen en el archivo *config.properties* :

El usuario podrá cambiar estas cantidades en el archivo, pero NO debe cambiar el nombre del atributo (*Pccc*, *CE* y *CE_{Control}*). Las líneas que contiene el signo *#* son comentarios que no se toman en cuenta a la hora de cargar los valores. Por lo tanto si el usuario necesita agregar algún comentario adicional, lo puede hacer sin inconvenientes.

Configuración de Celda y Servicios

El primer paso que debe realizar el usuario luego de ejecutar el software, es configurar las características de la celda, e incluir los servicios que se quieren ofrecer en dicha celda.

Para esto, deberá presionar “Configurar” y luego “Celda” como se muestra en la figura [22](#).

Se abrirá una ventana en la cual el usuario podrá cambiar algunos parámetros de la celda. Por ejemplo, podrá seleccionar el entorno de trabajo (Rural, Suburbano , Urbano o Urbano Denso) , la potencia máxima de transmisión

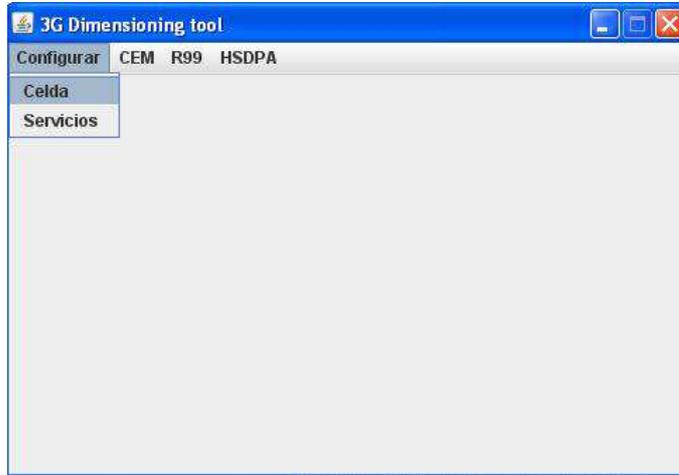


Figura 22: Pantalla Principal

de la celda (MaxTxPower) y un factor de carga para el Uplink que varía de 0 a 1. Por otro lado el usuario podrá seleccionar si la celda trabaja con *HSDPA* haciendo click en el casillero, y en caso afirmativo, deberá indicar el porcentaje de potencia destinada para HSDPA y el Throughput mínimo que se quiere garantizar a los usuarios. En caso que se desee trabajar con potencia HSDPA “On Demand”, se debe dejar en 0 el porcentaje de potencia para HSDPA.

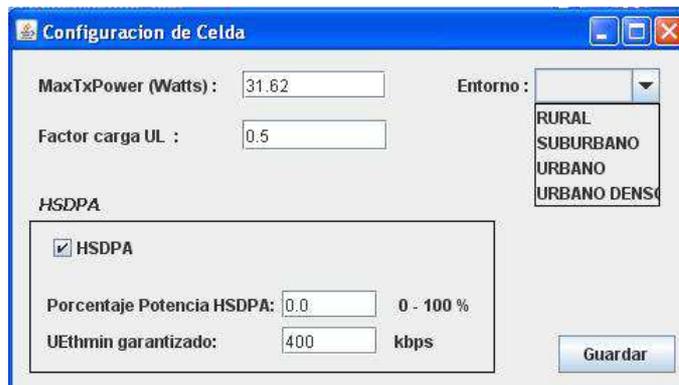


Figura 23: Pantalla Configuración Celda

Luego de definir la celda, el usuario deberá seleccionar los servicios que serán ofrecidos. Para ello, en la parte superior de la ventana Servicios (figura 24) deberá configurar los servicios R99 completando los parámetros solicitados y presionar “Agregar”. A medida que se agregan servicios, se muestran

en la tabla que aparece en la parte inferior de la pantalla, para que el usuario pueda observar la mezcla de servicios que está definiendo.

Con respecto a los servicios HSDPA se sigue la misma lógica, el usuario completa los datos solicitados y presiona “Agregar”. La única diferencia al agregar servicios HSDPA, es que se setea una tasa de arribos HSDPA única y queda definida la tasa de arribos de cada servicio HSDPA según el porcentaje (“Proporción en HS”). Es claro que en el caso de agregar varios servicios HSDPA la suma de las proporciones debe ser 100 %.

The screenshot shows a software window titled "Configuración de Servicios". It contains two main configuration sections and a summary table.

Servicio R99: PS64_PS64 (dropdown), fac. Actividad UL: 0.3, fac. Actividad DL: 0.6, Tasa de arribos: 0.005, Duración (seg): 200. Buttons: Agregar.

Servicio HSDPA: HSDPA128 (dropdown), fac. Actividad UL: 0.6, Proporción en HS (%): 100, Tam. descarga HS (KB): 5000. Total arribos HSDPA: 0.0. Buttons: Setear, Agregar.

Servicio	fac. Actividad UL	fac. Actividad DL	Tasa de arribos	Duración (s)	Tam. descarga ...
CS12_CS12	0.5	0.5	0.0733	75	
PS64_PS64	0.3	0.6	0.0050	200	
HSDPA128	0.6		0.0		5000

Buttons: Quitar, Guardar.

Figura 24: Pantalla Configuración Servicios

Bloqueo CEM

Para calcular el bloqueo debido a falta de Channel Elements , se ingresa en la opción “CEM” y luego “bloqueo CE”. En dicha ventana (figura 25) el usuario puede indicar la cantidad máxima de CE que contiene el nodo B (radio base). Este caso de uso es el único que se realiza de forma independiente a los servicios seleccionados en la configuración, ya que este estudio se realiza por nodo B y no por sector, y los únicos parámetros que importan son la tasa de arribos, duración y el costo en CE de cada servicio. Por lo tanto el usuario selecciona los servicios que quiere analizar, completa la tasa de arribos de ese servicio en los 3 sectores, la duración promedio de las sesiones, y presiona “Calcular”, obteniendo los bloqueos de cada servicio.

El costo en CE de cada servicio, es un valor tabulado que en general no cambia, sin embargo el usuario puede modificarlo si así lo desea en el archivo de configuración “config.properties”.

	Duración (seg.):	Sector 1	Sector 2	sector 3	Bloqueo (%)
CS12_CS12	75	0.06	0.04	0.03	6.3407946E-15
PS64_PS128	200	0.002	0.002	0.002	5.036664E-14
PS64_PS384	500	0.001	0.003	0.0	4.360975E-13

Figura 25: Pantalla Bloqueo CEM

Bloqueos servicios R99 por potencia

Para calcular este caso de uso, se debe previamente configurar la celda y los servicios R99, y luego seleccionar en el menú “R99”, “Bloqueo Potencia R99”. En dicha ventana (figura 26), el usuario puede seleccionar si imponer o no la limitante por códigos. En caso que el usuario no desee imponer la restricción por falta de códigos, obtendrá debajo, la cantidad de estados inválidos. En caso que seleccione limitar por códigos, la cantidad de estados inválidos será cero (ya que los estados inválidos por falta de códigos se eliminan). Luego de presionar “Calcular” se despliegan los resultados, el nombre de cada servicio y su bloqueo.

Service	Probability
CS12_CS12	8.262685879731448E-5
CS64_CS64	6.024920374947681E-4
PS64_PS384	0.0024275117824123123

Estados sin códigos disp.: 313 de 3257

Figura 26: Pantalla Bloqueo Potencia R99

Crecimiento proporcional de servicios R99

Para calcular este caso de uso, se debe previamente configurar la celda y los servicios R99, y luego seleccionar en el menú “R99”, “Crecimiento Proporcional”. En dicha ventana (figura 27) el usuario puede seleccionar que bloqueos objetivos quiere para CS (Circuit Switched) y PS (Packet Switched). Esto quiere decir que todos los servicios que se sirven sobre CS tengan un bloqueo menor al objetivo y todos los servicios PS también tengan un bloqueo menor al objetivo marcado (por defecto se toma bloqueo CS 2% y bloqueo PS 5%). Luego de presionar “Calcular” el usuario podrá observar para cada servicio, cuál fue su bloqueo, la tasa de arribos y los Erlangs ofrecidos por ese servicio.

The screenshot shows a software window titled "Crecimiento Global de servicios". It contains two input fields for maximum blockages: "Bloqueo máximo CS (0 a 1):" with a value of 0.02, and "Bloqueo máximo PS (0 a 1):" with a value of 0.05. A "Calcular" button is positioned between these fields. Below is a table with four columns: "Servicio:", "Bloqueo:", "Lambda:", and "Erlangs:". The table contains three rows of data and two empty rows.

Servicio:	Bloqueo:	Lambda:	Erlangs:
CS12_CS12	0.0022806153	0.1367	10.2524999999
CS64_CS64	0.015587083	0.0342	2.907
PS64_PS384	0.04926315	0.0068	3.4

Figura 27: Pantalla Crecimiento proporcional R99

Análisis de R99 + HSDPA (a potencia Fija)

Para calcular este caso de uso, se debe previamente configurar la celda (incluyendo HSDPA en la celda y definiendo un throughput mínimo por usuario y una porcentaje de potencia para HSDPA) y los servicios R99 y HSDPA. Luego seleccionar en el menú “HSDPA”, “Bloqueos a potencia fija HS”. En dicha ventana (figura 28), al igual que en el caso de bloqueos por potencia servicios R99, el usuario puede seleccionar si imponer o no la limitante por códigos.

Luego de presionar “Calcular” se despliegan los resultados: el nombre de cada servicio , su bloqueo y el throughput por usuario esperado en HSDPA.

The screenshot shows a software window titled "Probabilidad de Bloqueo y GoS". It contains the following elements:

- Cortar por códigos
- HSDPA:**
 - Throughput promedio (kbps): 177.0
 - Nro. prom. usuarios HS: 0.3
- Probabilidad Bloqueo:**

CS12_CS12	0.011246418373971062
CS64_CS64	0.06874703997104006
PS64_PS384	0.28394583172952165
HSDPA128	8.866965320950068E-5
- Estados sin códigos disp.: 0 de 6115
- Calcular

Figura 28: Pantalla Bloqueo R99 + HSDPA a potencia fija

Análisis de R99 + HSDPA con potencia on demand (Arribos máximos)

Para calcular este caso de uso, se debe previamente configurar la celda (incluyendo HSDPA On Demand en la celda y definiendo un throughput mínimo por usuario). Además se deben definir los servicios R99 y HSDPA. En particular en este caso no importa si se ha seteado o no la tasa de arribos para HSDPA, ya que es una de las salidas del caso. Luego seleccionar en el menú “HSDPA”, “Tasa de arribos máxima (Respetando R99)”. En dicha ventana (figura 29), el usuario puede observar los servicios que ha definido antes, y tiene la posibilidad de setear los bloqueos objetivos para CS y PS. Al igual que en los casos anteriores, se puede definir si tomar en cuenta la limitante por códigos o no.

Finalmente, luego de presionar “Calcular” se observa en una tabla los resultados requeridos. Se despliega para cada porcentaje de potencia destinada a HSDPA, la tasa de arribos que se puede ofrecer respetando los bloqueos de R99 por debajo del valor objetivo.

Setting de Servicios

Servicio	Tasa de arribos	Duración (s)	Tam. descarga HS (KB)
CS12_CS12	0.0733	75	
PS64_PS64	0.0080	100	
HSDPA128	0.0		5000

Bloqueo Objetivo R99

Bloqueos CS:

Bloqueos PS:

Cortar por códigos

Setting de HSDPA

UEthMin:

Resultados de Potencia HS

Pot. HS	Arribos Máx HS	Bloqueo CS	Bloqueo PS
0 %	0.0	8.3433E-5	1.50001E-4
5 %	0.0	0.0	0.0
10 %	0.0	0.0	0.0
15 %	0.0	0.0	0.0
20 %	0.0	0.0	0.0
25 %	0.0040	3.0E-9	7.0E-9
30 %	0.01	1.055E-6	2.412E-6
35 %	0.018	3.1499E-5	6.9021E-5
40 %	0.03	3.6767E-4	7.72759E-4
45 %	0.048	0.002406338	0.004845497
50 %	0.07	0.007733586	0.015024418
55 %	0.092	0.014572712	0.027620419
60 %	0.112	0.019789478	0.037048017
65 %	0.122	0.020357895	0.043922384
70 %	0.0	0.094766262	0.150943418

Figura 29: Pantalla Arribos máximos HSDPA

Análisis de R99 + HSDPA con potencia on demand (Throughput mínimo asegurado)

Para calcular este caso de uso, se debe previamente configurar la celda (incluyendo HSDPA On Demand en la celda y definiendo un throughput mínimo por usuario). Además se deben definir los servicios R99 y HSDPA. Es mandatorio definir para los servicios de HSDPA la tasa de arribos.

En dicha ventana (figura 30), el usuario puede observar los servicios que ha definido antes, y tiene la posibilidad de setear los bloqueos objetivos para CS y PS. Al igual que en los casos anteriores, se puede definir si tomar en cuenta la limitante por códigos o no.

Finalmente, luego de presionar “Calcular” se observa los resultados requeridos, el máximo throughput mínimo que se puede garantizar y la potencia destinada a HSDPA a la cual se da ese throughput.

Setting de Servicios

Servicio	Tasa de arribos	Duración (s)	Tam. descarga (KB)
CS12_CS12	0.0733	75	
PS64_PS64	0.0080	100	
HSDPA128	0.0040		5000

Bloqueo Objetivo R99

Bloqueos CS:

Bloqueos PS:

Cortar por códigos

Setting de HSDPA

Arribos HSDPA:

Resultados:

UEthMin (kbps):

Potencia HSDPA disponible:

Figura 30: Pantalla throughput mínimo garantizado HSDPA

Análisis conjunto servicios HSDPA con Potencia Fija Para calcular este caso de uso, se debe previamente configurar la celda (incluyendo HSDPA con potencia Fija en la celda y definiendo un throughput mínimo por usuario). Además se deben definir los servicios HSDPA. Luego seleccionar en el menú “HSDPA”, “Tasa de arribos máxima (solo HSDPA)”.

En dicha ventana (figura 31), el usuario puede observar los servicios HSDPA que ha definido y presionando “Calcular” se obtiene la tasa de arribos máxima, el throughput de la celda, el throughput promedio por usuario, y el número esperado de usuarios HSDPA instantáneos.

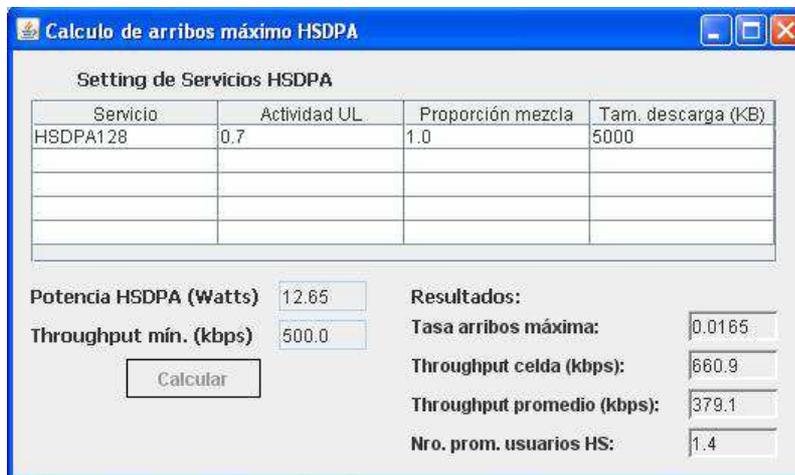


Figura 31: Pantalla Análisis HSDPA

13. Anexo B: Cadenas de Markov

En este anexo se pretende dar un breve repaso de las principales herramientas y conceptos sobre *Cadenas de Markov* que se aplicaron en el desarrollo de la herramienta de dimensionamiento. Para ampliar sobre este tema puede consultarse las notas del curso *Análisis de Performance en Redes de Datos* que dicta el Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería.

Las necesidades de nuestro modelo implican considerar el arribo de pedidos de establecimiento de un servicio, y la posterior liberación del mismo. Lo que se tiene entonces, es un conjunto de estados posibles de la celda. Un estado queda determinado por la cantidad de usuarios de cada servicio que están presentes en la celda en un instante dado. La dinámica de este sistema se modeló a través de una *Cadena de Markov en Tiempo Continuo* (CMTC). Para poder entender bien qué limitaciones y ventajas tiene este modelo, comencemos definiendo qué entendemos por Cadena de Markov.

Procesos estocásticos

Un proceso estocástico es una sucesión de variable aleatorias (V.A.) $\{X_t : t \in T\}$. Llamaremos X_t al estado del proceso en el tiempo t .

Cadena de Markov en Tiempo Discreto (CMTD)

Sea $X = \{X_n : n = 0, 1, 2, \dots\}$ un proceso estocástico que toma valores en un subconjunto $E = \{S_0, S_1, S_2, \dots, S_{n-1}\}$. X será una *Cadena de Markov* en tiempo discreto si, para todos los estados posibles $S_0, S_1, S_2, \dots, S_{n-1}$ y para todo $n \geq 0$ se verifica:

$$\begin{aligned} &P(X_{n+1} = S_j | X_n = S_i, X_{n-1} = S_{i-1}, \dots, X_0 = S_0) = \\ &= P(X_{n+1} = S_j | X_n = S_i) = P_{ij}(n) \end{aligned}$$

Dicho de manera informal, lo anterior significa que para que un proceso estocástico sea un CMTD, la probabilidad de pasar a un estado determinado en el tiempo n , deberá depender únicamente del estado en el tiempo $n-1$. Es decir que no depende de la historia completa de las transiciones de estados, sino del último estado.

En particular, una cadena de Markov se dice *homogénea* si las probabili-

dades de transición $P_{ij}(n)$ no dependen del *tiempo* n . En el caso de nuestro modelo, el análisis se plantea para la hora pico (BH) de tráfico en la celda. Entonces se hace la simplificación de que el comportamiento del tráfico durante esa hora es el mismo, y por ende podemos decir que la cadena de Markov que tomamos para modelar la celda en la BH es una cadena homogénea, ya que no vamos a considerar cambios en la demanda de tráfico, ni en la forma en que se usan los servicios a lo largo de la BH. Lo anterior implica que el sistema es invariante durante la BH, por lo cual es de esperar que las probabilidades de transición de estados no varíen con el tiempo, dejándonos así una cadena de Markov homogénea.

Distribución de la cadena

Se define para cada tiempo n , un vector de probabilidades $\pi_n \in \mathbb{R}^k / \pi_n(i) = P(X_n = i)$ es la probabilidad de estar en el estado i -ésimo en el instante n , cuando se tienen k estados posibles. Dicho vector se denomina *vector de distribución de probabilidades de la cadena en tiempo n* .

Distribución límite

Dado una distribución de la cadena en tiempo inicial π_0 , se dice que el vector π es una distribución límite de π_0 , si el límite cuando $n \rightarrow \infty$ de π_n existe y es π .

En nuestro caso es de interés que la distribución límite exista, sea única, y sea siempre la misma cualquiera sea la distribución inicial π_0 que tenga la celda. Lo anterior es importante ya que no tiene sentido suponer una distribución particular de probabilidades para la celda en el instante inicial (el comienzo de la hora pico por ejemplo).

Distribución invariante

Se dice que el vector de probabilidades π es una distribución invariante o estacionaria de la cadena si:

$\pi = \pi * P$ donde P es la *matriz de transición de estados* definida como la matriz que almacena las probabilidades de transición entre los posibles estados y verifica que $\pi_n = \pi_{n-1} * P = \pi_0 * P^n$

La teoría nos asegura que si el espacio de estados es finito, entonces siempre existe al menos una distribución estacionaria. Lo anterior es el caso de

nuestra celda, ya que el control de acceso a la misma y la limitación en cuanto a recursos de radio determina un límite finito para la cantidad de usuarios de cada servicio que es posible servir simultáneamente, y por lo tanto la cantidad de estados posibles de la celda es finita. A lo anterior hay que sumar que las cadenas definidas como en nuestro caso, cumplen un par de propiedades que aseguran que la distribución invariante π sea única. Esas propiedades son: *irreducible* y *aperiódica*.

Según lo visto hasta aquí, nuestra cadena de Markov que modela la celda, posee una distribución de probabilidades invariante π . En realidad no podemos afirmarlo todavía ya que hasta ahora sólo hemos visto propiedades y definiciones para cadenas en tiempo discreto, pero la cadena que nos interesa resolver a nosotros es en tiempo continuo, ya que un pedido de establecimiento de servicio puede arribar a la celda en cualquier momento. Pasemos entonces a repasar los aspectos más relevantes sobre CMTC que avalan nuestro modelo.

Cadenas de Markov en Tiempo Continuo (CMTC)

Sea $X = \{X(t), t \geq 0\}$ un proceso estocástico de tiempo continuo, que toma valores en un subconjunto E discreto. X será una *cadena de Markov* en tiempo continuo si, para todo $0 \leq s, i, j, x(u) \in E$ se cumple que:

$$P(X_{s+t} = j | X_s = i, X_u = x(u), 0 \leq s) = P(X_{s+t} = j | X_s = i)$$

tomando $s = 0$ lo escribimos $P(X_t = j | X_0 = i)$

Si además esta probabilidad es independiente de s , entonces X se dice homogénea y tiene probabilidades de transición

$$p_{ij}(t) = P(X_{s+t} = j | X_s = i) \quad \forall s \geq 0$$

En el caso de CMTC, la matriz de transición se define para cada instante de tiempo t como: $P(t) = (p_{ij}(t))_{i,j \in E}$.

El generador infinitesimal de la CMTC

La matriz de transición definida arriba, cumple que:

$$P(t + s) = P(t) * P(s)$$

Operando sobre la expresión anterior se llega a que:

$$P(t) = e^{P'(0)t} = e^{Qt}$$

A Q se lo denomina *generador infinitesimal* y sus entradas q_{ij} con $i \neq j$ se interpretan como la cantidad de transiciones de i a j por unidad de tiempo. Además se puede demostrar que $q_{ii} = -\sum_{j \neq i} (q_{ij})$ con lo cual las filas de Q suman cero.

Alternativamente se puede definir una CMTC, como un proceso tal que el tiempo de permanencia en un estado i , tiene una distribución exponencial de parámetro γ_i , independiente para cada estado. A su vez, la elección del estado j , posterior al i , se realiza de acuerdo a las probabilidades de transición.

Distribución invariante

Análogamente a las CMTD, un vector de probabilidad π es una distribución invariante si:

$$\pi = \pi * P(t) \text{ para todo } t \geq 0$$

Derivando con respecto a t y evaluando en $t = 0$ se tiene que un vector de probabilidades π es invariante si verifica:

$$\pi * Q = 0$$

Cadena incluida

Sea $\{\tau_n\}$ la sucesión de los tiempos de transición de estados. Entonces $X_n = X_{\{\tau_n\}}$ es una CMTD y se le llama cadena incluida.

Entonces, los conceptos de *recurrencia e irreducibilidad* se definen en términos de la cadena incluida de la CMTC. Por lo tanto, en el caso de la cadena que usamos para modelar nuestro sistema, la cadena incluida es irreducible y recurrente positiva, por lo cual podemos asegurar la existencia y unicidad de la distribución estacionaria de probabilidad π de la CMTC. Esta distribución puede hallarse entonces, resolviendo el sistema lineal $\pi * Q = 0$.

Con lo visto hasta aquí hemos cubierto gran parte del fundamento teórico que respalda el modelo analítico seleccionado para nuestra celda 3G. A continuación, concluimos este anexo con algunas consideraciones generales en cuanto al modelado de los tiempos entre arribos de servicios y tiempo de

permanencia de los usuarios en la red.

Tasa de arribos y duración de servicios

En nuestro contexto, entendemos por *tasa de arribo del servicio X* como la cantidad de pedidos de establecimiento del servicio X, exitosos o no, que llegan a la celda por unidad de tiempo. El mismo se puede estimar a través de la información de los contadores de la celda, obteniendo la cantidad de solicitudes en la hora pico y dividiéndola entre 3600seg. Es usual en enfoques markovianos como el tomado en este proyecto, modelar el tiempo entre arribos, con distribución exponencial de parámetro λ ⁵⁰. También modelamos con distribución exponencial de parámetro μ , al tiempo de duración de un servicio dado. El parámetro μ se obtiene como el inverso del promedio de los tiempos de duración registrados en la hora pico para el servicio en cuestión.

Algunas propiedades de la distribución exponencial

La distribución exponencial, como se ha dicho, es usualmente elegida para modelar procesos de arribos y partidas de un sistema (entre otros) porque modela relativamente bien algunos aspectos de la realidad, pero más que nada porque trabajar con exponenciales posibilita el uso de algunas herramientas matemáticas que permiten la resolución de modelos analíticos que de otra forma serían inútiles por su complejidad. Para concluir este anexo explicamos una de las propiedades de las exponenciales que nos han sido de particular utilidad en los modelos planteados.

Mínimo de exponenciales

La idea a plantear aquí es determinar qué sucede cuando tenemos dos variables aleatorias independientes entre sí, ambas con distribución exponencial. Concretamente, si tenemos dos usuarios que de manera independiente utilizan un mismo tipo de servicio, sabemos que lo utilizarán durante un tiempo T_1 y T_2 respectivamente. Decir que estos tiempos son independientes entre sí parece razonable, ya que ambos le darán, en general, un uso que no depende del que le de el otro usuario (¡a menos que estén hablando entre ellos!). Entonces, si consideramos el tiempo T_0 como el tiempo que debo esperar desde que se establecen los dos servicios, hasta que se libera uno cualquiera de ellos; ¿qué distribución posee T_0 ? La respuesta es que es también tiene distribución exponencial, pero ahora surge otra pregunta; ¿cuál es el

⁵⁰Recordar que en este caso, λ^{-1} coincide con el promedio de los tiempos entre arribos

parámetro que caracteriza a dicha exponencial? Se puede demostrar entonces que si T_1 tiene distribución exponencial de parámetro λ_1 y T_2 tiene distribución exponencial de parámetro λ_2 , entonces el tiempo mínimo T_0 que hay que esperar para que se liberen los recursos de uno de los servicios, tendrá distribución exponencial de parámetro $\lambda_0 = \lambda_1 + \lambda_2$. Cabe señalar aquí, que si $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, entonces el tiempo medio de espera para la liberación de uno de los servicios estará dado por $(1/2\lambda)$ segundos, lo cual parece ir de la mano con la intuición. Lo anterior se generaliza a N exponenciales, y es de utilidad a la hora de armar el generador infinitesimal de la cadena, por ejemplo, para determinar el tiempo medio con que se liberan los recursos de un servicio, cuando existen M usuarios de ese servicio, cada uno de los cuales posee un tiempo medio de permanencia exponencial con media $1/\mu$.

14. Anexo C: Gestión de proyecto

14.1. Transcurso del proyecto

El proyecto comenzó oficialmente en marzo del 2007, al empezar la asignatura “Proyecto” con un curso de gestión que dicta Pablo Belzarena. Este curso terminó a mediados de mayo, con la entrega del plan de trabajo a seguir para la realización del proyecto.

El curso de gestión de proyectos transmite un mensaje claro: hay que planificar el trabajo, hay que ver el proyecto en su conjunto, conocer sus partes y su dimensión. Con estos elementos, se pueden buscar los caminos adecuados para proceder sin dejar cosas de lado ni llegar a puntos muertos. No es fácil planificar realmente todos los detalles, ni estimar bien los tiempos y dificultades, especialmente teniendo poca experiencia y menos cuando los tiempos muchas veces son marcados por el cliente. Pero aún, una imagen grosera es fundamental.

14.1.1. El plan

Es interesante analizar la planificación que hicimos en aquel momento y compararlo con el transcurso real. El plan presentado, dividía al proyecto en 3 etapas.

En la primera de ellas, de 2 meses, se debía estudiar la red 3G en su conjunto, y las tecnologías implicadas: WCDMA y HSDPA. Esto se iba a realizar en paralelo a los seminarios de estudio fijados por el convenio, de los cuales uno sería a cargo de nosotros (QoS, calidad de servicio), siendo este un hito de nuestro proyecto.

La segunda etapa, de 4 meses, constaba del estudio y discriminación de parámetros para el dimensionado de WCDMA. El objetivo de esta etapa, era poder implementar un primer modelo de dimensionado y en paralelo ir desarrollando una primera versión del software. El plazo de esta etapa, se había fijado con el entregable de gestión de proyectos en setiembre.

En la última etapa, de 5 meses (más otro de buffer), se debía tener el mo-

delo consolidado, y así desarrollar la versión final del software en el lenguaje acordado. Esto implicaba, tener funcionando el software con los casos de usos que plantearía el cliente en su momento y poder analizar los resultados del mismo.

Estas dos etapas anteriores, estaban de la mano con la búsqueda y asimilación de herramientas de simulación, no solo para evaluar los principales parámetros de la red, sino también para validar los resultados de la herramienta a desarrollar.

A continuación mostraremos el diagrama de Gantt (figuras 32 y 33) que se había generado en el plan de proyecto y que contemplaba las etapas antes mencionadas. Las diferentes actividades no tenían responsable asignado, debido a que nos habíamos propuesto ir avanzando los tres a la vez.

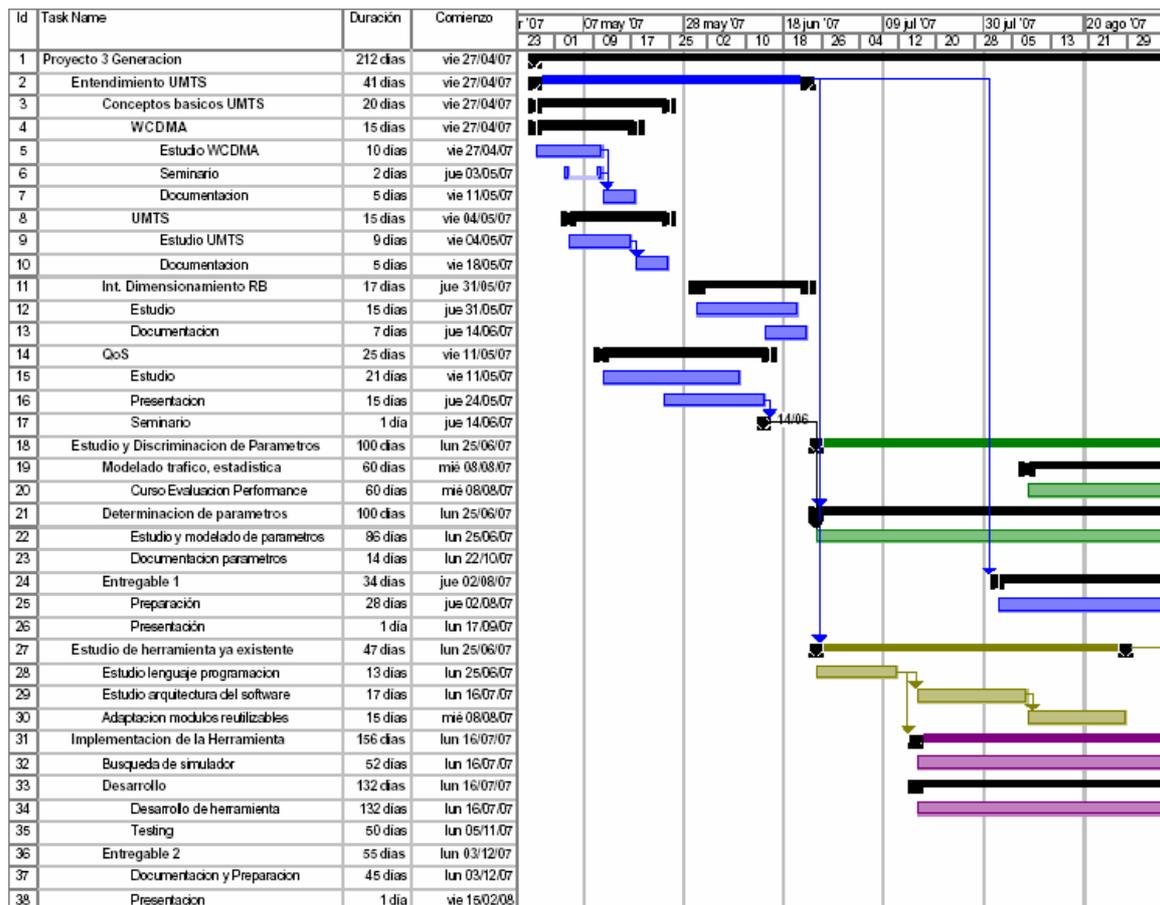


Figura 32: Diagrama de Gantt desde el inicio hasta fines de agosto

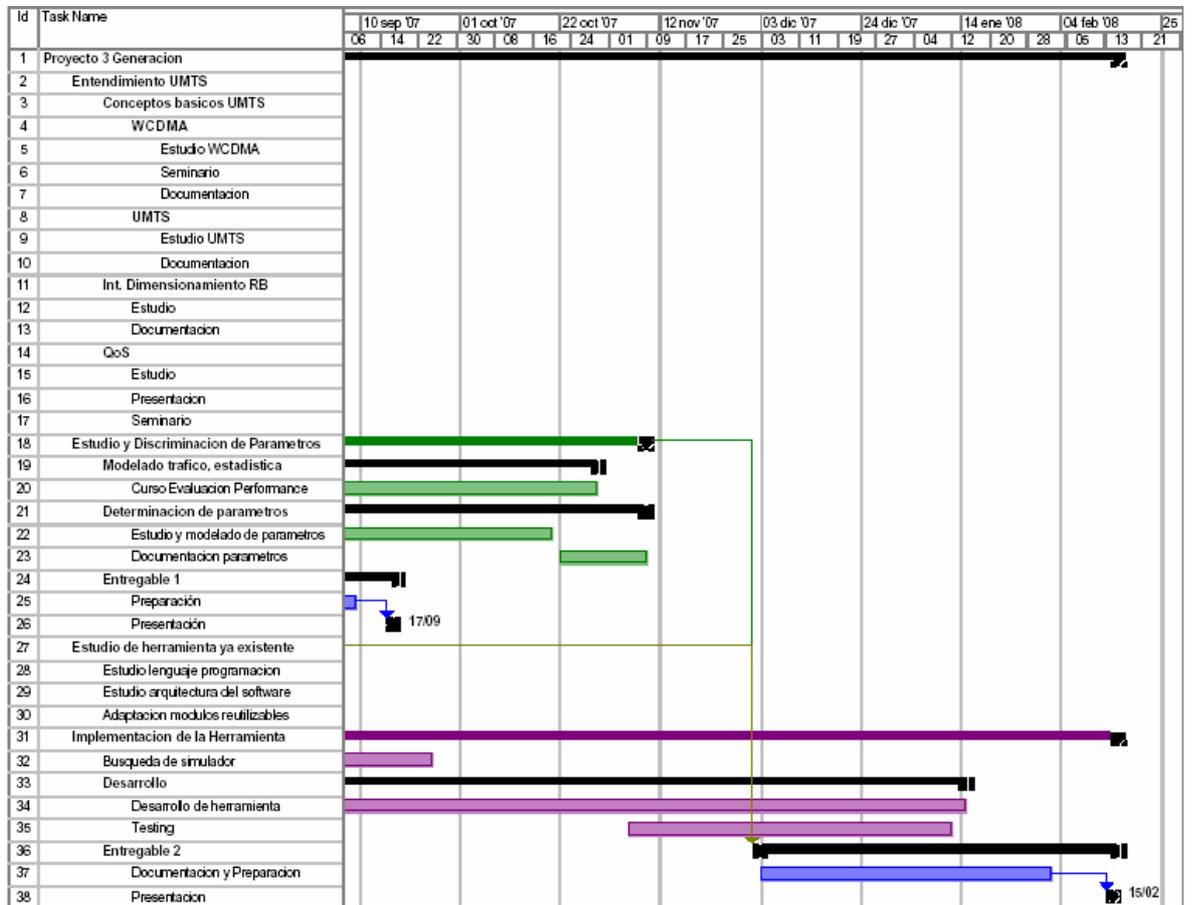


Figura 33: Diagrama de Gantt desde setiembre hasta el final

La fecha objetivo de fin, era a fines de febrero del 2008 y debía llevar unas 1600 horas ($3 \times 35 \text{ créditos} \times 15\text{h} \times \text{coeficiente del estudiante}$).

14.1.2. Transcurso real

Como ocurre en todo proyecto, y especialmente cuando se tiene poca experiencia, nos apartamos de diversas formas de la planificación original. Parte de los cambios se debieron a razones externas, como fechas de exámenes, cambios en planes laborales o cambios propios del convenio.

La primer etapa planteada, se realizó a través de la asistencia a los seminarios semanales del convenio. Estos se atrasaron un mes respecto a lo que esperábamos, incidiendo en que no tuviéramos un panorama muy claro de los resultados que esperaba el cliente de nuestro trabajo. De todas formas, se era consciente de que un modelo markoviano se iba a utilizar, por lo que se empezó a trabajar en él antes de que terminaran los seminarios, y así poder seguir con el plan inicial y no caer en un punto muerto. Cabe resaltar que el único caso de uso claro en esta fecha, era obtener probabilidades de bloqueo de una mezcla de servicios.

En la segunda etapa, se empezó analizando el trabajo presentado por Nortel, implementando luego una primera versión del software en matlab. Si bien nos sirvió para tener los primeros resultados de bloqueo, creemos que se perdió mucho tiempo en esto (dos meses), ya que sólo se trabajó para dos servicios y que el cambio a Java fue grande, dejando como consecuencia un retraso no esperado.

En paralelo a esto, el convenio se separó en cuatro grupos de trabajo: dimensionado, calidad de servicio, mediciones y simuladores. Los tres, participamos del grupo de dimensionado, cuyo objetivo era profundizar los conceptos relacionados a la capacidad de una celda incluyendo modelos markovianos para su estudio. Este grupo fue clave para discernir sobre los parámetros a tomar en cuenta en el modelo, ya que la idea básica salió de acá y llevando a que a fines de setiembre, se tuvieran dos casos de uso más: crecimiento proporcional y bloqueos por CE. Cuando finalizó el tiempo planificado de ésta etapa, se tenía el modelo consolidado de R99.

Empezando la última etapa, se resolvieron los dos casos de uso anteriores y se agregaron a lo realizado en Java. También se extendió la mezcla de servicios

a cinco (valor acordado con el cliente). Según el plan ya teníamos un atraso de un mes y esto aumentaría al enfrentarnos con los problemas de memoria y velocidad de procesamiento. En enero y febrero, nos dedicamos a solucionar estos tiempos y se realizó el modelo que contemplaba HSDPA. En marzo se consolidaron los casos de uso relacionados con HSDPA y se agregaron a la herramienta realizada, dejando para abril y mayo la documentación y los detalles finales.

14.2. Recursos y dedicación de horas

14.2.1. Dedicación

La dedicación horaria de cada integrante, se desvirtuó de lo planificado. Recién en setiembre se acompañó lo planificado en cuanto a horas, dejando para los últimos meses una carga bastante mayor. Todo esto se dio, debido a que los diferentes tiempos planificados los impuso el convenio, no dejando muchas veces ir más rápido que el mismo. A continuación mostraremos una tabla donde indicaremos las horas que dedicó cada integrante en el correr de cada mes.

<i>Promedio hs</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>M</i>
Planificadas	35	60	45	50	65	55	60	45	55	75	--	--	--
Reales	25	35	40	40	50	55	60	60	60	75	75	75	0

Las horas invertidas de cada estudiante fue de 675, siendo más de lo planificado pero en mayor tiempo.

14.2.2. Costos del proyecto

Los costos del proyecto fueron cero, ya que el programa se hizo con software libre y no necesitábamos gastar en ningún material. Este fue el único punto que le faltó al proyecto, mirado desde la gestión de proyectos, para compararlo con uno de la vida real.

15. Anexo D: Contenido del CD

El CD contiene las siguientes la siguiente estructura de carpetas y contenidos:

- Proyecto3G
 - Artículo: El artículo del proyecto en español (abstract en inglés).
 - Documentación: Pdf con la documentación del proyecto.
 - Tex files: Archivos fuente de la documentación.
 - Poster: Poster del proyecto.
 - Software
 - Ejecutable: Archivos .exe, config.properties y .jar.
 - Fuentes: Archivo .rar con los paquetes y sus respectivos .java.
 - Javadoc: Documentación de las principales clases de software.

Referencias

- [1] NORTEL, *UMTS BTS dimensioning: model*, Document number: UMT/IRC/APP/0049, France (2005).
- [2] Harri Holma, Antti Toskala, *HSDPA/HSUPA FOR UMTS: High Speed Radio Acces For Mobile*, England (2006).
- [3] Bernard Philippe, Youcef Saad y William J. Stewart *Numerical Methods in Markov Chain Modelling*, (1996).
- [4] Harri Holma, Antti Toskala, *WCDMA FOR UMTS, Radio Acces For Third Generation Mobile Communications* , (2000).
- [5] Pablo Belzarena, *Documento intermedio del convenio ANTEL-FING* , (2007). Capítulo *Dimensionado*.
- [6] David Soldani, Man Li, Renaud Cuny, *QoS and QoE management in UMTS Cellular System* , (2006).
- [7] QUALCOMM, *Air Interface Cell Capacity of WCDMA Systems* , (2006).
- [8] Viterbi, *Principles of Spread Spectrum communication*(Addison-Wesley *Wireless Communications*).
- [9] *3GPP TS 25.214, Physical layer procedures (FDD) (Release 6)*.