

**TESIS DEFENDIDA POR**  
**Aldo Luis Méndez Pérez**  
**Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ**

---

**Dr. David Hilario Covarrubias Rosales**  
*Director del Comité*

---

**Dr. César Vargas Rosales**  
*Miembro del Comité*

---

**Dr. Hugo Homero Hidalgo Silva**  
*Miembro del Comité*

---

**Dr. Roberto Conte Galván**  
*Miembro del Comité*

---

**Dr. José Rosario Gallardo López**  
*Jefe del Departamento de Electrónica  
y Telecomunicaciones*

---

**Dr. Luis Alberto Delgado Argote**  
*Director de Estudios de Posgrado*

**4 de Julio del 2003**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE  
EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA**



**DIVISIÓN DE FÍSICA APLICADA**

**DEPARTAMENTO DE  
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**CONTRIBUCIONES A LAS TÉCNICAS DE ACCESO AL  
MEDIO EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES  
DE TERCERA GENERACIÓN EN UN ENTORNO DS-CDMA**

**TESIS**

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener  
el grado de DOCTOR EN CIENCIAS presenta:

**ALDO LUIS MÉNDEZ PÉREZ**

**Ensenada, Baja California, México. Julio del 2003.**

**RESUMEN** de la tesis de **Aldo Luis Méndez Pérez**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN CIENCIAS en ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES. Ensenada, Baja California. Julio del 2003.

## **CONTRIBUCIONES A LAS TÉCNICAS DE ACCESO AL MEDIO EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES DE TERCERA GENERACIÓN EN UN ENTORNO DS-CDMA**

Resumen aprobado por:

---

Dr. David H. Covarrubias Rosales  
Director de Tesis

El éxito de los sistemas de comunicaciones móviles se basa en gran medida en dos aspectos: la técnica de acceso al medio (MAC) y la técnica de asignación de recursos (*scheduling*). En el primer aspecto, dada la aleatoriedad en la presencia y demanda de servicios de usuarios móviles en la red inalámbrica, se requiere de una técnica MAC con buenas prestaciones en cuanto a estabilidad, eficiencia, retardo y capacidad de manejo de tráfico. En esta tesis reportamos, de acuerdo a los requerimientos anteriores, el modelado y simulación de aquellos parámetros que mayormente influyen en las prestaciones en términos de estabilidad y eficiencia, de la técnica MAC basada en S-ALOHA. Además, se presenta un esquema adaptable a las condiciones del tráfico, que mejora de esta manera el sistema S-Aloha/DS-CDMA convencional, en términos de caudal eficaz y retardo.

El segundo aspecto, está asociado con la capacidad de acceder equitativamente al canal, al mismo tiempo, asegurar la calidad de servicio y conseguir una utilización óptima de los recursos de la red, considerando un tráfico multimedia. En esta tesis abordamos un estudio de una nueva propuesta de asignación de recursos para obtener equidad, QoS y un óptimo uso de los recursos. La propuesta es denominada Acceso Múltiple por División de Código/Controlador Centralizado con Pesos Dinámicos (CDMA/GPS-DW) y está basada en una política GPS (controlador centralizado). Los resultados de simulación muestran que el esquema propuesto garantiza QoS para tráfico multimedia y hace uso eficiente de los recursos de la red.

**Palabras clave:** Control de Acceso al Medio, CDMA de Banda Ancha, Controlador Centralizado, Algoritmo de Asignación de Recursos, Acceso Múltiple por División de Código/Controlador Centralizado con Pesos Dinámicos.

**ABSTRACT** of the Thesis of **Aldo Luis Méndez Pérez**, presented as a partial requirement to obtain the DOCTOR in SCIENCE degree in ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS. Ensenada, Baja California, México. July of 2003.

**CONTRIBUTIONS TO THE MEDIUM ACCESS TECHNIQUES  
IN THIRD GENERATION MOBILE COMMUNICATION SYSTEMS  
IN A DS-CDMA ENVIRONMENT**

The success of mobile communication systems is based mainly on two aspects: the Medium Access Control (MAC) scheme and the resource assignment technique. The first aspect, caused by randomness in the presence and demand of services by the mobile terminals requires a MAC technique with good performance regarding stability, efficiency, delay, and capacity of traffic control. This thesis reports, according to the previous requirements, the modeling and simulation of those parameters, which most influence the performance in terms of stability, and efficiency of the MAC technique based on Slotted ALOHA (S-ALOHA). In addition, this thesis presents an adaptive S-Aloha/DS-CDMA packet random access scheme for improving the throughput and delay of the conventional S-Aloha/DS-CDMA system.

The second aspect, is associated with the capability of fair channel access to multimedia users, while at the same time, guaranteeing a given QoS and optimal utilization of network resources. Scheduling policies play a crucial role in achieving desired QoS goals and optimum utilization of limited resources. This thesis deals with the experimental study of a new proposed scheduling policy for achieving fairness, QoS, and optimal use of resources. The proposed scheduling policy is Code Division Multiple Access based on Generalized Processor Sharing with Dynamic Weights (CDMA/GPS-DW) as an improvement of a previous GPS policy. Simulation results show that the proposed policy achieves fairness of the specified QoS, and makes an efficient use of the network resources.

**Keyword:** Medium Control Access, Wideband CDMA, Generalized Processor Sharing, Scheduling Algorithm, Quality of Service, Code Division Multiple Access/Generalized Processor Sharing-Dynamic Weights.



## **DEDICATORIA**

**Con todo mi corazón a mis padres: Félix Méndez y Juana Pérez, por todo el amor, comprensión, consejos y apoyo que me han dado para poder seguir adelante y cumplir mis metas que me he propuesto.**

**A mi Abuelita: Natalia Mora, por el amor y consejos que me ha dado.**

**A mis hermanos: Norma, Alma, Félix, Matías e Irving, por el cariño y apoyo que me han brindado.**

**A mis sobrinas: Ayutzin, Nataly y Aleyda, por la alegría que han llevado a la familia.**



## **AGRADECIMIENTOS**

**De manera muy especial y con un profundo agradecimiento a mi asesor Dr. David Covarrubias por brindarme su confianza, tiempo, consejos, motivación, paciencia y asesoría para que este trabajo de investigación llegara a un feliz término.**

**A los miembros de mi comité de tesis: Dr. César Vargas, Dr. Roberto Conte y Dr. Hugo Hidalgo por sus comentarios positivos, disponibilidad y motivación.**

**Al Grupo de Comunicaciones Inalámbricas por el apoyo incondicional recibido.**

**A Panduro, Angel, Claudio, Muraoka, Alor, Luis, Alejandro por su amistad y apoyo recibido durante mi estancia en el cicese.**

**A Lorena Soto por sus consejos y haber cultivado una gran amistad durante muchos años.**

**A CONACYT por su apoyo económico y darme la oportunidad de superarme académicamente.**



# CONTENIDO

<b>I INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
I.1 MARCO DE REFERENCIA .....	1
I.2 MOTIVACIÓN .....	4
I.3 OBJETIVO GENERAL .....	7
I.4 CONTRIBUCIONES .....	8
I.5 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO .....	8
<b>II ESTANDARIZACIÓN DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES DE TERCERA GENERACIÓN .....</b>	<b>10</b>
II.1 INTRODUCCIÓN .....	10
II.2 COMUNICACIONES MÓVILES DE TERCERA GENERACIÓN .....	11
II.3 ESTANDARIZACIÓN DE SISTEMAS 3G .....	18
II.4 ESTADO ACTUAL DE LOS SISTEMAS 3G .....	23
II.5 CONCLUSIONES .....	24
<b>III MODELO DEL SISTEMA PARA LAS DIFERENTES FASES DE OPERACIÓN EN UNA RED MÓVIL CELULAR 3G .....</b>	<b>25</b>
III.1 INTRODUCCIÓN .....	25
III.2 MODELO DEL SISTEMA PROPUESTO PARA REDES MÓVILES DE TERCERA GENERACIÓN .....	25
III.2.1 S-ALOHA COMO UN SUBCONJUNTO DE LA TÉCNICA MAC .....	27
III.2.2 MEJORAS A LA FASE DE PETICIÓN DE CANAL .....	28
III.2.3 ENTORNO DE MÚLTIPLES USUARIOS SIMULTÁNEOS (S-ALOHA/DS-CDMA) .....	28
III.2.4 ASIGNACIÓN DE RECURSOS .....	29
III.2.5 CALIDAD DE SERVICIO GARANTIZADA PARA TRÁFICO MULTIMEDIA .....	31
III.3 CONCLUSIONES .....	31
<b>IV. S-ALOHA COMO CANAL DE PETICIÓN (CANAL RACH) .....</b>	<b>32</b>
IV.1 INTRODUCCIÓN .....	32
IV.2 MODELADO DEL CANAL RACH .....	33
IV.2.1 ANÁLISIS DEL CANAL RACH A TRAVÉS DE CADENAS DE MARKOV .....	35
IV.2.2 PROBABILIDADES DE ESTADOS ESTABLES .....	37
IV.3 ANÁLISIS DE PRESTACIONES .....	40
IV.3.1 ANÁLISIS DEL CAUDAL EFICAZ .....	40
IV.3.2 ANÁLISIS DEL RETARDO PROMEDIO .....	42
IV.4 SIMULACIONES Y ANÁLISIS NUMÉRICO .....	43
IV.5 CONCLUSIONES .....	47
<b>V. MEJORAS AL CANAL RACH: ALTA EFICIENCIA Y ESTABILIDAD .....</b>	<b>49</b>
V.1 INTRODUCCIÓN .....	49
V.2 EFECTO CAPTURA .....	50
V.3 MODELADO DEL CANAL RACH CON EFECTO CAPTURA .....	51
V.3.1 PROBABILIDAD DE CAPTURA CONSIDERANDO DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y EFECTO DEL CANAL RADIO .....	53

V.4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD .....	58
V.5 ANÁLISIS NUMÉRICO Y RESULTADOS .....	61
V.5.1 COMPORTAMIENTO DEL CAUDAL EFICAZ .....	62
V.5.1.1 Distribución espacial uniforme (DEU) de los TMs y efecto captura (EC).....	62
V.5.1.2 Distribución espacial uniforme (DEU), efecto captura (EC) y efecto del canal radio (ECR).....	63
V.5.2 COMPORTAMIENTO DE LA ESTABILIDAD .....	65
V.5.2.1 Comportamiento del caudal eficaz con estabilidad.....	65
V.5.2.2 Comportamiento del número de TMs bloqueados con estabilidad.....	66
V.5.2.3 Comportamiento del retardo promedio con estabilidad.....	68
V.6 CONCLUSIONES.....	69
<b>VI ANÁLISIS DEL ESQUEMA S-ALOHA/DS-CDMA .....</b>	<b>70</b>
VI.1 INTRODUCCIÓN .....	70
VI.2 MODELO DE S-ALOHA/DS-CDMA.....	71
VI.3 ESQUEMAS DE MULTI-VELOCIDADES EN SISTEMAS DS-CDMA.....	76
VI.3.1 MULTI-MODULACIÓN .....	76
VI.3.2 MULTI-GANANCIA DE PROCESADO.....	79
VI.3.3 MULTI-CÓDIGOS (MULTI-CANAL O CANALES PARALELOS).....	80
VI.3.4 EVALUACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE MULTI-VELOCIDADES.....	81
VI.4 MODELO DE S-ALOHA/DS-CDMA ADAPTABLE A LAS CONDICIONES DEL TRÁFICO EN EL CANAL.....	86
VI.5 MODELO DE S-ALOHA/DS-CDMA CON MAYOR NÚMERO DE TERMINALES MÓVILES QUE CÓDIGOS .....	88
VI.6 ALGORITMOS PARA EL CAMBIO EN LA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN .....	91
VI.6.1 ALGORITMO CONTROLADO POR EL TERMINAL MÓVIL .....	91
VI.6.2 ALGORITMO CONTROLADO POR LA ESTACIÓN BASE.....	91
VI.7 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS NUMÉRICO.....	92
VI.7.1 VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN CONSTANTE.....	93
VI.7.2 ALGORITMO CONTROLADO POR EL TERMINAL MÓVIL .....	96
VI.7.3 ALGORITMO BS-I CONTROLADO POR LA ESTACIÓN BASE.....	98
VI.7.4 ALGORITMO BS-II CONTROLADO POR LA ESTACIÓN BASE .....	100
VI.8 CONCLUSIONES .....	102
<b>VII ASIGNACIÓN DE RECURSOS Y CALIDAD DE SERVICIO GARANTIZADA PARA SISTEMAS 3G .....</b>	<b>103</b>
VII.1 INTRODUCCIÓN .....	103
VII.2 ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS.....	105
VII.2.1 ESQUEMA DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS CDMA/GPS-DW .....	108
VII.2.2 CONTROL DE PETICIÓN DE CÓDIGOS PARA CDMA/GPS-DW.....	112
VII.2.3 ASIGNACIÓN DEL ANCHO DE BANDA MÍNIMO PARA CDMA/GPS-DW .....	117
VII.2.3.1 Asignación dinámica de pesos.....	119
VII.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS NUMÉRICO .....	121
VII.4 CONCLUSIONES .....	127
<b>VIII CONCLUSIONES .....</b>	<b>128</b>
VIII.1 CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....	128
VIII.2 PUBLICACIONES COMO RESULTADO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	132
VIII.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	133
<b>LITERATURA CITADA .....</b>	<b>135</b>
<b>APÉNDICE A. PROBABILIDAD DE TRANSICIÓN DE UNA ETAPA.....</b>	<b>148</b>
<b>APÉNDICE B. DISTRIBUCIÓN CONDICIONAL DE PAQUETES ADQUIRIDOS.....</b>	<b>151</b>





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Planteamiento del problema del trabajo de investigación. ....	6
Figura 2. Crecimiento de la telefonía móvil en México.....	13
Figura 3. Predicción de crecimiento de la telefonía móvil.....	14
Figura 4. Previsiones de uso de servicios multimedia de alta capacidad para Europa. ....	16
Figura 5. Bandas asignadas para IMT-2000. ....	20
Figura 6. Modelo del sistema propuesto para redes móviles de tercera generación. ....	26
Figura 7. Diagrama de transición de estados para una población finita.....	37
Figura 8. Comportamiento del caudal eficaz en el canal RACH. ....	45
Figura 9. Comportamiento del retardo promedio en el canal RACH. ....	46
Figura 10. Comportamiento del número de terminales bloqueados. ....	47
Figura 11. Transición de estados de para una información ternaria. ....	59
Figura 12. Comportamiento del caudal eficaz con una distribución uniforme.....	62
Figura 13. Comportamiento del caudal eficaz considerando los efectos de canal (Rayleigh y sombreado).....	64
Figura 14. Comportamiento del caudal eficaz mejorando la respuesta de estabilidad y eficiencia. ....	65
Figura 15. Comportamiento de TMs bloqueados estabilizado y alta eficiencia. ....	67
Figura 16. Comportamiento del retardo promedio estabilizado y alta eficiencia. ....	68
Figura 17. Características del sistema ALOHA-CDMA.....	70
Figura 18. Modelo para el sistema S-Aloha/DS-CDMA con $K \geq N$ .....	72
Figura 19. Comportamiento del caudal eficaz para un esquema S-Aloha/DS-DS-CDMA. ....	75
Figura 20. Comportamiento deseado del sistema S-Aloha/DS-CDMA.....	76
Figura 21. Comparación de diferentes esquemas de modulación de una sola velocidad en un canal AWGN.....	82
Figura 22. Prestaciones de los diferentes esquemas de multi-velocidades en un canal AWGN.....	84
Figura 23. Modelo S-Aloha/DS-CDMA con $K < N$ . ....	88
Figura 24. Comportamiento del caudal eficaz para distintas velocidades de transmisión...	94
Figura 25. Comportamiento del retardo para distintas velocidades de transmisión. ....	95
Figura 26. Comportamiento del caudal eficaz con el algoritmo MS. ....	96
Figura 27. Comportamiento del retardo con el algoritmo MS(1,5). ....	97
Figura 28. Comportamiento del caudal eficaz con el algoritmo BS-I con umbrales. ....	98
Figura 29. Comportamiento del retardo con el algoritmo BS-I con umbrales.....	99

Figura 30. Algoritmo BS-II. a) Comportamiento del caudal eficaz, b) comportamiento del retardo. ....	101
Figura 31. Modelo del sistema propuesto para un esquema de asignación de recursos CDMA/GPS-DW. ....	109
Figura 32. Diagrama de flujo del esquema de asignación de recursos CDMA/GPS-DW. ....	110
Figura 33. Porcentaje de paquetes descartados para a) vídeo y b) voz para los esquemas CDMA/GPS-DW y CDGPS. ....	123
Figura 34. Comportamiento del caudal eficaz para los esquemas CDGPS y CDMA/GPS-DW en un ambiente de multimedia. ....	124
Figura 35. Comportamiento del retardo para el esquema CDMA/GPS-DW: a) vídeo, b) voz y c) datos-WWW. d) Retardo comparativo entre los esquemas CDMA/GPS-DW y CDGPS. ....	126



## LISTA DE TABLAS

Tabla I. Evolución típica del mercado y la competencia en GSM hacia 3G.....	12
Tabla II. Propuestas de sistemas 3G sometidas a la ITU .....	19
Tabla III. Diferencias entre Cdma2000 y WCDMA.....	22
Tabla IV. Parámetros de simulación para el canal RACH.....	61
Tabla V. Parámetros para el sistema S-Aloha/DS-CDMA con $K \geq N$ . .....	72
Tabla VI. Sistemas de prueba para evaluación de multi-velocidad. ....	83
Tabla VII. Características de los diferentes esquemas de multi-velocidades . ....	83
Tabla VIII. Lista de parámetros adicionales para el sistema S-Aloha/DS-CDMA con $K < N$ . .....	89
Tabla IX. Parámetros de simulación de S-Aloha/DS-CDMA. ....	93
Tabla X. Parámetros de simulación para el algoritmo de asignación de recursos CDMA/GPS-DW.....	122



# I INTRODUCCIÓN

La tendencia de los esquemas de acceso múltiple para sistemas móviles celulares de tercera generación (3G), es proveer servicios multimedia (vídeo, voz y datos) y que sea adaptable a las condiciones del tráfico en el canal radio. Además, se requiere que estos esquemas cumplan con las calidades de servicio (QoS) que los usuarios demandan, medida en términos de paquetes descartados, tasa de error, retardo del paquete, ancho de banda, y relación señal a ruido, entre otros. Por lo tanto, esta tesis se centra en investigar una técnica de acceso que sea flexible al manejo de tráfico multimedia, con diferentes requerimientos de calidad de servicio para redes celulares de tercera generación. Por consiguiente, en la siguiente sección se da a conocer el marco de referencia con respecto a los requerimientos y propiedades que se deben tomar en cuenta en un esquema de acceso múltiple.

## I.1 MARCO DE REFERENCIA

Cuando un mismo recurso es susceptible de ser utilizado por varios usuarios independientes entre ellos aparece la necesidad de establecer un protocolo de acceso múltiple, a fin de gestionar y asignar el recurso escaso (ancho de banda y códigos) en cuestión. Si no considerase ningún tipo de protocolo, podrían ocurrir conflictos si más de un usuario quisiera acceder al recurso al mismo tiempo [Covarrubias, 1999].

Los protocolos de acceso múltiple deberán evitar, o cuanto menos ser capaces de resolver, los citados conflictos.

En el entorno de las comunicaciones móviles celulares, es importante destacar que la mencionada compartición de recursos es más esencial y necesario, puesto que el interfaz aire, que es el soporte de la transmisión, es único.

Los requerimientos de un protocolo de acceso múltiple son [Covarrubias, 1999]:

- Compartir el canal de transmisión común entre los diferentes usuarios del sistema. Para ello, el protocolo debe establecer la manera en que los usuarios acceden al canal, siguiendo una serie de reglas específicas.
- Realizar la asignación de forma que el medio de transmisión se use eficientemente. El grado de eficiencia se mide habitualmente en términos del caudal eficaz - *throughput* (número medio de transmisiones con éxito por intervalo temporal) y del retardo de las transmisiones.
- La asignación de recursos debe ser equitativa entre los usuarios, a no ser que quieran establecerse prioridades entre ellos.
- El protocolo debe ser estable, lo que significa que si el sistema está en equilibrio, un incremento en la carga ofrecida al mismo debe llevar al sistema a un nuevo punto de equilibrio.

En particular en el entorno móvil el protocolo de acceso múltiple debe ser capaz de soportar los efectos de:

- El '*hidden terminal problem*', en el cual dos terminales se encuentran aparentemente fuera de cobertura a causa de obstáculos, pero dentro del área real de cobertura de la estación base [Hernando y Pérez, 1999].
- El efecto cerca-lejos, producido por la diferencia en potencia recibida debido a las distancias a las que se encuentran los terminales móviles de la estación base [Goodman, 1987].
- Los efectos característicos del canal móvil, que provocan desvanecimientos sobre el nivel de la señal recibida [Sant, 2000].

- Los efectos derivados de la estructura celular en las comunicaciones móviles, como por ejemplo la interferencia co-canal aparecida por el reuso de frecuencias [Covarrubias, 1999].

Muchas de las propiedades mencionadas anteriormente entran en conflicto entre sí, por lo que debe llegarse a una solución de compromiso en el diseño de las propiedades del protocolo de acceso múltiple.

Los protocolos de control de acceso múltiple (MAC) sugeridos y analizados hasta la fecha son muy numerosos, por lo tanto, en esta sección clasificaremos estos protocolos para que de esta forma puedan ser situados conceptualmente. Se puede establecer la siguiente clasificación [Alonso, 2001].

- Protocolo sin contención. Los accesos al canal se efectúan sin conflicto, de modo que los usuarios transmiten de forma ordenada y planificada. Así pues, cada transmisión que se efectúe tendrá éxito desde el punto de vista del acceso múltiple. A su vez, estos protocolos se dividen en:
  - Asignación fija de recursos. La capacidad del canal se reparte entre los diferentes usuarios de manera estática, independientemente de si hay o no información a transmitir.
  - Asignación de recursos bajo demanda. La capacidad del canal se distribuye de forma ordenada, pero únicamente entre los usuarios que disponen de información para transmitir.
- Protocolo con contención. Las transmisiones de los usuarios no están planificadas, por lo que no se tiene un conocimiento exacto de los usuarios dispuestos a transmitir. Al permitirse colisiones, debe establecerse necesariamente un procedimiento de retransmisión. También pueden dividirse a su vez en:
  - Acceso aleatorio con reserva. Hay contención únicamente en el acceso. Una vez se ha conseguido el acceso al canal, se efectúa una reserva de los recursos de modo de

que los demás usuarios no intentarán acceder al mismo hasta que se complete la transmisión en curso.

- Acceso aleatorio repetitivo. Todos los accesos que se realizan son aleatorios, por lo que hay posibilidad de conflicto en cada una de las transmisiones que se efectúen.

Bajo este marco de referencia, es necesario por lo tanto determinar cual es nuestra motivación para definir nuevas propuestas en los esquemas de acceso múltiple para sistemas 3G y esto es tratado a continuación.

## **I.2 MOTIVACIÓN**

Ante la entrada inminente de los sistemas móviles de tercera generación, el control de acceso al medio así como la asignación de recursos son dos aspectos importantes en el diseño de estos sistemas. Por lo cual, es necesario proponer estrategias para obtener:

- estabilidad en el sistema,
- alta eficiencia,
- manejo de tráfico multimedia,
- flexibilidad en el ancho de banda,
- mayor capacidad en función del número de usuarios,
- uso eficiente del espectro de frecuencia,
- velocidades de transmisión variable,
- tasas de error aceptable,
- control de admisión y
- asignación equitativa de recursos.

Estas estrategias nos deben llevar a proponer algoritmos con el fin de que el sistema sea tanto adaptable a las condiciones del tráfico como equitativo en la asignación de recursos (ancho de banda y códigos) para servicios multimedia, y además garantizando la calidad de servicio.

La investigación a nivel mundial sobre estos algoritmos, ha adquirido una relevancia muy significativa en los últimos años, debido fundamentalmente a la puesta en marcha experimental de los primeros sistemas comerciales de 3G.

Un gran número de algoritmos de asignación de recursos han sido propuestos para redes alámbricas [Zhang, 1995]. Sin embargo, estos algoritmos de asignación de recursos no pueden ser aplicados directamente a redes inalámbricas debido a las restricciones técnicas del interfaz aire. Por otra parte, los algoritmos actuales que poseen una adaptabilidad a las condiciones del tráfico como los propuestos en [Kim D. *et al.*, 2001], [Vannithamby, 2000], [Park,2000], [Cao, 1998] solo manejan tráfico de datos, no garantizan calidad de servicio, no aplican algún control de admisión y tampoco hacen asignación de recursos. En el caso de [Sallent y Agustí, 2000], [Sandouk *et al.*, 2000], [Naraghi-Pour, 2000] manejan solamente tráfico integrado de voz y datos, en cambio [Sandouk *et al.*, 1999] y [Jeon *et al.*, 1998] garantizan calidad de servicio. Otros trabajos de investigación que manejan tráfico integrado de voz/datos y además llevan a cabo una asignación de recursos son propuestos en [Kim J. *et al.*, 2001] y [Kang *et al.*, 2000].

Por lo anterior, es necesario el estudio de nuevas propuestas de sistemas adaptativos capaces de ajustar los parámetros de transmisión a las necesidades concretas de la información a transmitir. Además deben llevar a cabo una asignación equitativa de recursos, siempre con el objetivo de maximizar la eficiencia en el uso del canal y garantizando la calidad de servicio en un tráfico multimedia, ya que esto es de gran importancia por su aplicabilidad inmediata en el diseño de nuevos sistemas de comunicaciones móviles.

El panorama descrito a lo largo de esta sección nos indica que el problema a resolver lo podemos visualizar en tres etapas (Figura 1):

- 1) MAC
- 2) Asignación equitativa de recursos.
- 3) Garantía de calidad de servicio en sistemas 3G para tráfico multimedia.



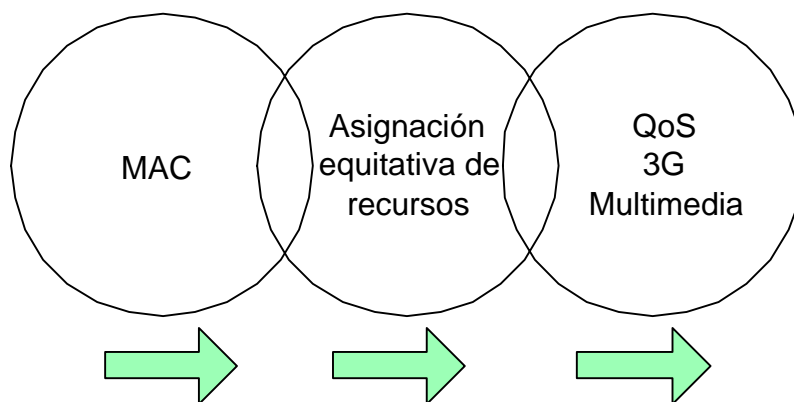


Figura 1. Planteamiento del problema del trabajo de investigación.

En la etapa MAC se debe llevar a cabo la petición de canal para que múltiples usuarios puedan transmitir simultáneamente. Cuando hay un bajo tráfico (poco usuarios transmitiendo) la eficiencia del sistema es baja, ello es debido a que no hay más información que cursar y no a que la interferencia multiusuario produzca errores en las transmisiones de los paquetes. Así que la alternativa es aumentar la velocidad de transmisión de manera dinámica y obtener de esta manera un sistema adaptativo al tráfico en el canal.

En la etapa de asignación de recursos la estación base asignará los recursos de acuerdo a los requerimientos con que cuenta. Para esto, cada Terminal Móvil (TM) hace su petición de recurso y la estación base almacena ésta en una tabla de peticiones. En esta tabla de peticiones se almacena la siguiente información: tipo de servicio (vídeo, voz y datos), cantidad de información generada, tiempo de generación, estado de la memoria temporal (*buffer*) y tiempo de vida del paquete. Con esta información la estación base asigna los códigos de acuerdo a prioridades donde vídeo tiene la prioridad más alta y datos la más baja. Además, se toma en cuenta el estado de la memoria temporal, el ancho de banda que demandan y el tiempo de vida del paquete. Posteriormente la estación base asigna dinámicamente el ancho de banda a cada TM.

Finalmente en la etapa de calidad de servicio, ésta se debe garantizar ésta para un tráfico multimedia (vídeo, voz y datos). La calidad de servicio se dará en términos de paquetes descartados y retardo. Para esto, los límites de acuerdo al estándar UMTS (Sistema Universal de Comunicaciones Móviles) son: un 1% de paquetes descartados como máximo para voz y vídeo, un retardo máximo de 20 ms para voz, 150 ms para vídeo y 4 s para datos (datos de tipo WWW) [ETSI, 1997].

### **I.3 OBJETIVO GENERAL**

De acuerdo a lo anterior, se puede definir como objetivo principal de esta tesis el desarrollo de un algoritmo de asignación equitativa de recursos para sistemas adaptativos de tercera generación, orientados a una técnica MAC con el objeto de maximizar la eficiencia en el uso del canal y con capacidad de manejar tráfico multimedia, garantizando la calidad de servicio.

Para alcanzar dicho objetivo, la estrategia del proceso de investigación ha considerado las siguientes metas:

- Modelado y análisis de la técnica de acceso al medio.
- Definición de algoritmos para la adaptación del tráfico en el canal (solo para datos).
- Definición del algoritmo de asignación equitativa de recursos, el cual debe contemplar:
  - manejo de tabla de peticiones,
  - adaptación de la técnica MAC al algoritmo de asignación de recursos,
  - control de admisión,
  - manejo de tráfico multimedia,
  - garantía de calidad de servicio,
  - flexibilidad en el ancho de banda,
  - mayor capacidad en función del número de usuarios y
  - tasa de error aceptable.

## **I.4 CONTRIBUCIONES**

Con este trabajo de investigación se busca contribuir en las técnicas de acceso al medio, definiendo un algoritmo de asignación equitativa de recursos para un esquema MAC para sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación que mejore de modo substancial los existentes hasta este momento en términos de:

- flexibilidad para integrar tráfico multimedia,
- calidad para satisfacer los requerimientos del servicio tales como retardo máximo y máxima pérdida de paquetes tolerada,
- capacidad del sistema en función del número de usuarios dado un determinado ancho de banda y
- adaptabilidad con el objetivo de maximizar la eficiencia en el uso del canal.

Luego de haber presentado el objetivo y las contribuciones esperadas de esta tesis, a continuación se detalla la estructura de la presente tesis doctoral, junto con una breve descripción del contenido de cada uno de los capítulos.

## **I.5 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO**

En el presente capítulo se presentó el marco de referencia, la motivación para llevar a cabo este trabajo de investigación, el objetivo general y las contribuciones al estado del arte.

En el Capítulo II se presenta una descripción del proceso de estandarización para los sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación. Además, se explica por qué es importante la creación de una nueva generación de sistemas de comunicaciones móviles. Por otro lado, se mencionan las características más importantes del estándar que se usará a lo largo de esta tesis.

En el Capítulo III se presenta el modelo del sistema que proponemos en esta tesis, con la idea de tener lo más claro donde se ubican los problemas a resolver, la inter-relación entre ellos y los elementos involucrados en el modelado, simulación y evaluación del sistema.

En el Capítulo IV se realiza la descripción detallada de la fase de petición de canal (como un subconjunto del protocolo MAC), su modelo matemático y las simulaciones realizadas. Además, se determinan las limitaciones que presenta este protocolo.

En el Capítulo V se describen las mejoras propuestas a la fase de petición, por lo cual, se modifica el modelo matemático hecho en el Capítulo IV. Adicionalmente, se determina qué parámetros del sistema son más sensitivos y cómo afectan cada uno de éstos en las prestaciones del sistema. El resultado debe ser una fase eficiente de petición de canal.

Una vez optimizada la respuesta del sistema en la fase de petición de canal, en el Capítulo VI se analiza el modelado y simulación de un entorno de múltiples usuarios simultáneos y adaptable al tráfico en el canal.

Después de haber resuelto los problemas relacionados en la etapa MAC, en el capítulo VII se aborda la problemática en la etapa de transmisión, para esto se propone un nuevo algoritmo de asignación de recursos con garantías de calidad de servicio y adaptable al tráfico en el canal (vídeo, voz y datos).

Por último, en el Capítulo VIII se presentan las conclusiones relacionadas al trabajo de investigación reportado en esta tesis, así como las publicaciones obtenidas como resultado del proceso de investigación. Además, las líneas futuras de investigación relacionadas que pueden suscitarse de los estudios realizados en la presente tesis doctoral.



## II ESTANDARIZACIÓN DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES DE TERCERA GENERACIÓN

### II.1 INTRODUCCIÓN

Las Comunicaciones Inalámbricas han atravesado en menos de tres décadas por una evolución acelerada de tres generaciones, motivada en parte por la vertiginosa demanda de movilidad y portabilidad en las comunicaciones, la cual no fue prevista en sus inicios. Por otra parte también está la revolución digital por la cual están atravesando las telecomunicaciones, lo cual motivó que ahora se esté investigando y desarrollando la tercera generación de estos sistemas.

La primera generación introducida en 1980, estuvo orientada hacia sistemas analógicos con servicio de voz, usando como técnica de acceso FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia). Los principales estándares fueron: AMPS (Servicio Telefónico Móvil Avanzado), TACS (Sistema de Comunicación de Acceso Total) y NMT (Sistema Telefónico Móvil Nórdico) [Rappaport, 2001]. Con esta primera generación se consiguió un 10% de penetración del mercado mundial de las telecomunicaciones. Los sistemas de primera generación presentaban como principales desventajas: baja capacidad y calidad además de incompatibilidad entre dichos sistemas.

En 1993 se inició la segunda generación de sistemas de comunicaciones móviles tales como: GSM (Sistema Global para Telecomunicaciones Móviles), DCS 1800 (Servicio

Celular Digital a 1800 MHz), DECT (Telecomunicación Digital Europeo de Bajo Alcance) con tecnología digital y redes inteligentes, IS-136 (Estándar Interino de Acceso Múltiple por División de Tiempo) e IS-95 (Estándar Interino de Acceso Múltiple por División de Código), entre otros [Padgett, *et al.*, 1995]. En esta segunda generación se proporcionó voz digital y servicio mínimo de datos (principalmente conmutación de circuitos para transmisión de baja velocidad 9600 bps). En esta generación persistieron las incompatibilidades entre sistemas [Rappaport, 2001]. Estos sistemas fueron esencialmente desarrollados para soportar voz digital en ancho de banda angosta con limitada capacidad de transmisión de datos.

Con la introducción de los sistemas de tercera generación [Prasad, 2000], las capacidades de los sistemas de segunda generación son extendidas. Estos sistemas pueden manejar servicio de multimedia, velocidades variables y adaptables a las condiciones del tráfico, garantizando la calidad de servicio, aunque de manera limitada. Este trabajo de tesis presenta maneras de eliminar algunas de las limitaciones, que se describirán más adelante.

Este capítulo tiene como objetivo analizar cuales son las características más importantes de los sistemas 3G así como determinar algunos aspectos que se consideran importantes para la creación de una nueva generación de sistemas de comunicaciones móviles. Además, presentar cómo ha sido el proceso de estandarización y a través de esto conocer los parámetros que nos servirá para determinar el protocolo MAC que será utilizado a lo largo de esta tesis.

## **II.2 COMUNICACIONES MÓVILES DE TERCERA GENERACIÓN**

La introducción del sistema GSM en Europa desde principios de la década de los noventa, con la incorporación de la tecnología digital, la posibilidad de utilizar un sistema normalizado en todos los países y la consiguiente reducción de precios que posibilitan un mercado más amplio y un marco más competitivo, ha puesto una auténtica revolución en la

sociedad. La [Tabla I](#) muestra las diferentes fases en la implantación del sistema GSM, donde la primera de ellas corresponde básicamente a un entorno poco competitivo y con baja penetración de usuarios, en la que el operador realiza únicamente servicio de voz [[Sallent, 1999](#)]. A medida que el sistema gana aceptación y aumenta la competencia, las estrategias de los operadores se dirigen a un mayor uso de los recursos disponibles mediante la prestación de nuevos servicios. Llegados a este punto quedan todavía algunas potencialidades del sistema GSM por explotar como la transmisión de datos de manera más intensiva que permita descargar y ejecutar aplicaciones tipo telebancaria, consulta de cotizaciones mediante la tarjeta inteligente (*smartcard*) llamada SIM, siguiendo una arquitectura cliente-servidor.

Tabla I. Evolución típica del mercado y la competencia en GSM hacia 3G.

Medio	Impulsor de Mercado	Fase	Acción	Penetración
GSM Fase 1	Voz	Inicial	Atraer Usuarios	Poca
GSM Fase 2	Servicio (buzón de voz, prepago)	Sofisticación	- Diferenciación - Aumentar tráfico	10-30%
GSM Fase 2+	- Datos - Internet	Maduración y límites tecnológicos	- Aumentar tráfico - Desarrollo y aplicaciones de datos - Preparar siguiente paso	30- 40%
3G	Contenidos multimedia	Nueva era	Desarrollar mercado	40-50%

No obstante, la provisión de servicios más sofisticados topa definitivamente con las limitaciones tecnológicas del propio sistema GSM, un sistema que empezó a tomar forma en 1992 y que si bien se diseñó con perspectivas de futuro permitiendo un entorno multi-operador, no deja de estar básicamente optimizado para transmisión de voz. Por lo tanto,

parece claro que es necesario ampliar las capacidades de los sistemas de comunicaciones móviles para satisfacer, a mediano plazo las nuevas necesidades, dando lugar a los que se conoce como sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación o sistemas 3G. Algunos aspectos que se consideran importantes para la creación de una nueva generación de sistemas de comunicaciones móviles se plantean a continuación.

1) El intenso crecimiento de la penetración en el mercado de los sistemas de segunda generación, ha provocado que en algunos países el número de terminales móviles haya superado el número de líneas fijas de telefonía. A manera de ejemplo la [Figura 2](#) muestra el incremento de la telefonía móvil en los últimos años en México, donde el crecimiento hace que se prevea a mediano plazo una saturación en las capacidades de los sistemas de segunda generación. Esto hace patente la búsqueda de nuevas bandas de frecuencia y de nuevos sistemas que permitan hacer frente a la demanda con un uso más eficiente de los recursos [[COFETEL, 2003](#)].

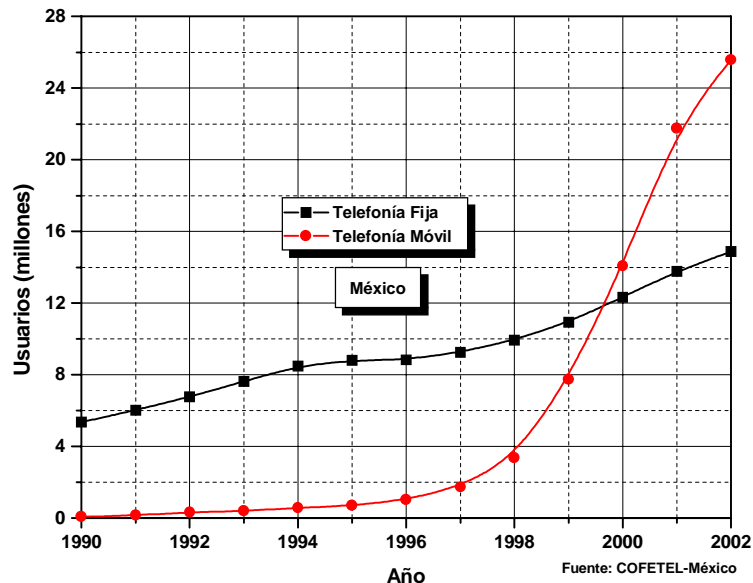


Figura 2. Crecimiento de la telefonía móvil en México.



En la [Figura 3](#) se muestra, a modo de ilustración, las previsiones de crecimiento en los usuarios de telefonía móvil para la próxima década [[UMTS-1, 1999](#)], donde se observa como prácticamente se prevé doblar el número de usuarios cada 5 años, especialmente en lo que a la región Asia-Pacífico se refiere, motivo por el que, de hecho, es Japón uno de los países que lideren el camino hacia los sistemas de tercera generación.

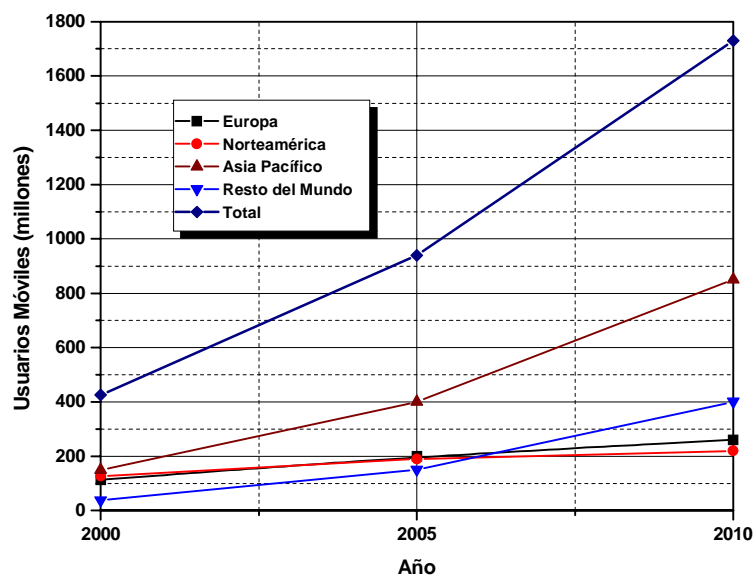


Figura 3. Predicción de crecimiento de la telefonía móvil.

2) Otro aspecto importante, es el crecimiento del acceso a Internet y de la evolución del mercado de las comunicaciones móviles. Es de esperar que la combinación de ambos en un acceso a Internet desde redes móviles, pueda suponer un enorme mercado potencial de cara a los próximos años [[UMTS, 2002](#)].

Si bien los sistemas celulares de segunda generación como GSM son capaces de ofrecer acceso a Internet, lo hacen en modo circuito, lo que presenta enormes limitaciones no sólo en términos de la velocidad de transmisión empleada sino también de la eficiencia en el uso de los recursos, pues este tipo de aplicaciones se caracterizan por generar la información a ráfagas con lo que durante buena parte del tiempo el circuito no es utilizado.

Estas limitaciones redundan por un lado en una reducida capacidad para ofrecer este tipo de servicios, y por el otro en un precio de conexión para los usuarios mucho más elevado del que se puede llegar a ofrecer en una red fija.

En consecuencia, es deseable el diseño de nuevos sistemas que sean capaces de hacer frente a estas limitaciones con un uso más efectivo de los recursos, capaces de adaptarse a las nuevas características del tráfico mediante técnicas de transmisión orientadas a paquetes, constituyendo éste uno de los retos al que los sistemas de tercera generación deberán hacer frente.

3) La llamada sociedad de la información demandará cada vez más disponer de servicios como correo electrónico, acceso a redes corporativas, acceso a Internet, videoconferencia, comercio electrónico, multimedia y muchos otros. Además, el usuario deseará mantenerse informado cuando se desplaza de un sitio a otro, disfrutando de los citados servicios en cualquier lugar y en cualquier momento. Para poder proporcionar la suficiente calidad de servicio en comunicaciones multimedia y acceso a Internet, claramente se necesitan velocidades de transmisión elevadas y sistemas de radio frecuencia (RF) que presenten una elevada eficiencia espectral.

La [Figura 4](#) pone de manifiesto el mercado potencial que este tipo de servicios supone en el ámbito de las comunicaciones móviles, presentando las perspectivas de crecimiento del número de abonados totales a sistemas móviles en la Unión Europea y diferenciando aquéllos que únicamente emplearán servicios de voz o de datos de baja velocidad [[UMTS, 1998](#)]. En el 2005, habrá 200 millones de usuarios, de los cuales 32 millones usando servicios de multimedia. Para el año 2010, habrá 260 millones de usuarios y 90 millones utilizarán servicio de multimedia.

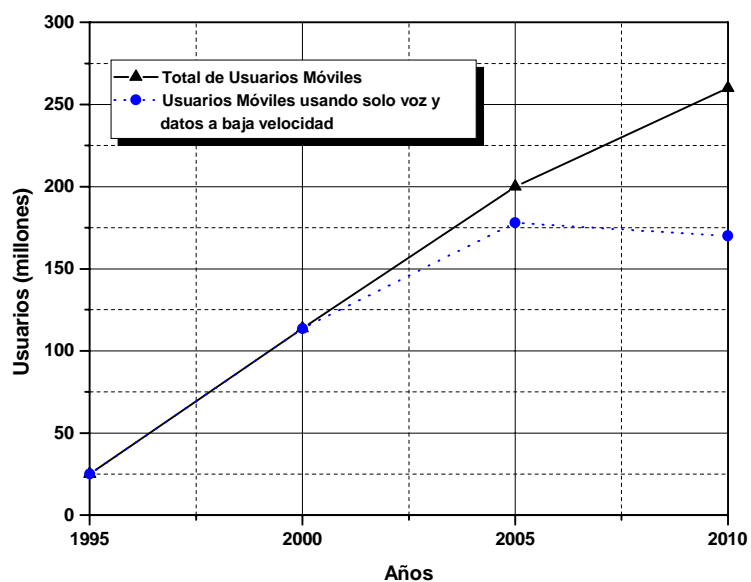


Figura 4. Previsiones de uso de servicios multimedia de alta capacidad para Europa.

Como se observa en la [Figura 4](#), es a partir del año 2000 cuando empieza a existir un cierto porcentaje de usuarios (en Europa) con servicios de alta velocidad, con previsiones del 16 % para el año 2005 y del 30 % para el año 2010. Se prevé incluso que el número de usuarios móviles con requerimientos únicamente de voz o baja velocidad llegue a decrecer en tanto que los usuarios tenderán a aprovechar al completo las facilidades que puedan ofrecer los nuevos sistemas.

Por otra parte, y puesto que muchas aplicaciones multimedia están orientadas a trabajar en modo paquete, es esencial optimizar las técnicas de la tercera generación para soportar transmisión por paquetes así como velocidades de transmisión variable. De esta forma, los mismos recursos pueden ser compartidos por mucho usuarios, aprovechando la naturaleza de este tipo de comunicaciones para mejorar la eficiencia en su utilización.

4) Por último, reseñar también el interés en lograr un sistema de comunicaciones móviles verdaderamente global que permita una movilidad universal con operación entre redes pertenecientes a países diferentes, llegando incluso a reunir bajo un sistema común las tres zonas geográficas de mayor influencia que son Europa, Estados Unidos y Japón.

El ámbito de actuación de los sistemas de tercera generación se pretende englobar los diferentes entornos existentes bajo un único sistema, en función de la cobertura ofrecida, desde los sistemas vía satélite hasta los más reducidos entornos de interiores, con objeto de permitir una movilidad universal de terminales capaces de soportar aplicaciones personalizadas de muy variada naturaleza.

Para asegurar el éxito de los servicios 3G, se ha de proporcionar a los usuarios con comunicaciones muy eficientes, con una alta velocidad y calidad y, además, fáciles de utilizar. Por lo tanto, los sistemas de 3G deben ofrecer [Castro, 2001]:

- Transmisión simétrica/asimétrica de alta fiabilidad.
- Uso de ancho de banda dinámico, en función de la aplicación.
- Velocidades binarias mucho más altas: 144 kbps en alta movilidad, 384 kbps en espacios abiertos y 2 Mbps en baja movilidad.
- Soporte tanto de conmutación de paquetes (IP) como de circuitos.
- Soporte IP para acceso a Internet (navegación WWW), videojuegos, comercio electrónico, y vídeo y audio en tiempo real.
- Diferentes servicios simultáneos en una sola conexión.
- Calidad de voz igual a la ofrecida en la red fija.
- Soporte radioeléctrico flexible, con utilización más eficaz del espectro, con bandas de frecuencia comunes en todo el mundo.
- Personalización de los servicios, según perfil de usuario.
- Servicios dependientes de la posición (localización) del usuario.
- Incorporación gradual en coexistencia con los sistemas actuales de 2G.
- Itinerancia (*roaming*), incluido el internacional, entre diferentes operadores y tipos de redes.
- Ambientes de funcionamiento marítimo, terrestre y aeronáutico.
- Capacidad de terminales multibanda y multientorno.

- Economías de escala y un estándar global y abierto que cubra las necesidades de un mercado de masas.
- Provisión de un ambiente local virtual (VHE): el usuario podrá recibir el mismo servicio independiente de su ubicación geográfica.

### **II.3 ESTANDARIZACIÓN DE SISTEMAS 3G**

Durante la última década se han dedicado muchos esfuerzos de investigación en línea con los esfuerzos de la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) y otros organismos en búsqueda de los estándares y recomendaciones que permitan dotar a las comunicaciones móviles de capacidades multimedia con calidad similar a la de las redes fijas. La ITU ha definido IMT-2000 (Telecomunicación Móvil Internacional 2000) como una familia abierta de sistemas 3G más que un sistema único. Varios organismos de estandarización regionales estuvieron involucrados en el proceso de definición de estándares para IMT-2000, entre ellos ETSI (Instituto Europeo de Estándares en Telecomunicaciones) en Europa, ARIB (Asociación de Industriales de la Radio y Negocios) en Japón y TIA (Asociación de la Industria en Telecomunicaciones) en Estados Unidos. El pariente europeo de la familia IMT-2000 se conoce con el nombre de UMTS (Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles). La ITU fijó el 30 de junio de 1998 como plazo para que los diferentes miembros pudieran presentar propuestas de RTT (Tecnología de Radio-Transmisión) como interfaz radio de IMT-2000.

En el camino hacia UMTS en general y en la presentación de una propuesta a la ITU en particular, la Comisión Europea ha patrocinado varios programas de investigación como RACE-I (Investigación Sobre Avances en Comunicaciones para Europa – Fase I) , RACE-II (RACE Fase II) y ACTS (Tecnología Avanzada en Comunicaciones y Servicios) para estimular dichos avances.

Tras un largo proceso de discusión y evaluación de distintas posibilidades las decisiones adoptadas en Europa entrevieron una revolución en cuanto al interfaz radio a adoptar en la tercera generación, mientras que la parte de red se desarrolló de manera evolutiva, basada en los sistemas que estaban en funcionamiento en su momento. En la [Tabla II](#) se muestran las principales propuestas sometidas a la ITU, en las cuales se observa una clara predominancia de los sistemas basados en tecnología CDMA (Acceso Múltiple por División de Código). Las diferentes propuestas fueron evaluadas de acuerdo con los escenarios y metodologías definidos por la ITU y llevados a cabo por diferentes países, resultando en dos sistemas destacados: UTRA/WCDMA (Acceso Radio Terrestre Universal/CDMA de banda ancha) de la ETSI y ARIB y cdma2000 de los Estados Unidos [[Chaudhury, 1999](#)].

Tabla II. Propuestas de sistemas 3G sometidas a la ITU

Propuesta	Organismo
DECT	ETSI, Europa
UWC-136	TIA, Estados Unidos
WINS W-CDMA	TIA, Estados Unidos
TD-SCDMA	CATT, China
W-CDMA	ARIB, Japón
CDMA I	TTA, Corea del Sur
CDMA II	TTA, Corea del Sur
UTRA	ETSI, Europa
NA W-CDMA	TIPI, Estados Unidos
Wideband cdmaOne (cdma2000)	TIA - propuesto por Estados Unidos

El interfaz radio basado en CDMA y operación en banda ancha (WCDMA) abrió la oportunidad de diseñar un sistema con propiedades que cumplan los requerimientos de la tercera generación. WCDMA permitió mejorar las prestaciones sobre los sistemas de segunda generación tanto en términos de número de usuarios que pueden soportarse como en cobertura. Al mismo tiempo, la rápida evolución de las aplicaciones generó incertidumbre acerca de los servicios que se demandarán en el futuro, ante lo cual la opción más adecuada fue definir el sistema con unas ciertas capacidades mínimas y suficientemente flexible como para poder acomodar los servicios que puedan aparecer en el

futuro. Así, WCDMA proporciona un alto grado de flexibilidad que permite soportar diversas velocidades de transmisión y calidades de servicio demandadas, incluyendo transmisión en modo paquete. Desde el punto de vista del operador WCDMA también ofrece un alto nivel de flexibilidad.

A pesar de una tecnología de base común en las distintas propuestas (CDMA), la razón por la cual IMT-2000 se definió como una familia de sistemas atendió a la dificultad de lograr una convergencia real entre las distintas propuestas. En primer lugar, la ITU estableció bandas de frecuencia para IMT-2000 [UMTS-2, 1999] que no estaban enteramente disponibles en Europa, Japón y en Estados Unidos (ver Figura 5). Además, había intereses contrapuestos en cuanto a la compatibilidad del sistema hacia atrás: para Estados Unidos era primordial, ya que disponía del sistema de segunda generación IS-95 (Estándar Interino-95) que también está basado en CDMA, la urgencia en el desarrollo del proceso de estandarización para llegar a la implantación del mismo (Japón tuvo necesidades imperiosas de un sistema 3G) y conflictos de derechos de propiedad intelectual.

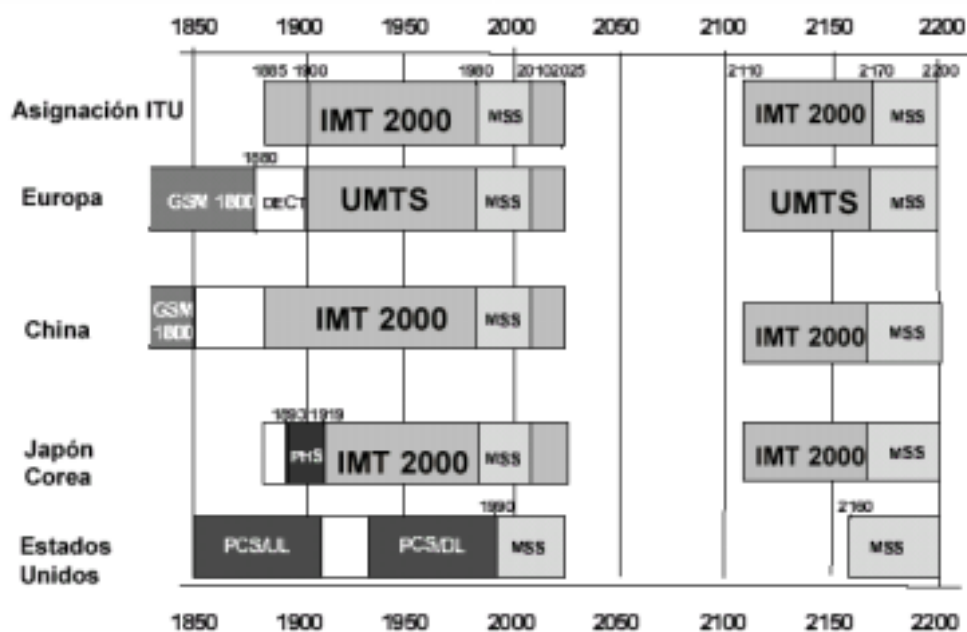


Figura 5. Bandas asignadas para IMT-2000.

En todo caso, para lograr un desarrollo consensuado del estándar se creó en diciembre de 1998 el llamado 3GPP (Proyecto Asociado para Sistemas de Tercera Generación), que agrupó a diversos agentes de estandarización en la órbita de WCDMA (ETSI y ARIB). En paralelo y promovido por la TIA y ANSI (Instituto Americano de Estándares), se constituyó 3GPP2 para coordinar el desarrollo de cdma2000. El claro enfrentamiento entre las dos opciones CDMA de banda ancha tomó mayor entendimiento y armonización desde que en marzo de 1999 Ericsson (uno de los principales defensores de WCDMA) decidió comprar a Qualcomm (principal defensor de cdma2000 y propietaria de numerosas patentes de invención de la tecnología CDMA) la parte dedicada al desarrollo de infraestructura de red. Las diferencias iniciales entre ambos sistemas se resumen en la [Tabla III \[Prasad \*et al.\*, 2000\]](#).

El despliegue de las redes 3G al principio de su ciclo de vida se vio facilitado con la aparición de terminales duales GSM/UMTS, concentrándose el mercado UMTS en servicios multimedia de tasas elevadas y transmisión por paquetes, complementando los servicios ofrecidos por GSM y sus posteriores mejoras HSCSD (Conmutación de Circuitos de Alta Velocidad para Datos), GPRS (Sistema General de Paquete Radio).

En cuanto al calendario de implantación en Europa, UMTS Fase 1, concerniente a UTRA, empezó en 2002, aunque Japón, en línea con UTRA, inició antes (2001) debido a problemas de saturación de espectro. Pero los resultados de las investigaciones de Forrester Research<sup>1</sup> no prevén beneficios antes de 2014, una vez que en 2007 tendrá solo 10% del mercado móvil comunicando en sistema de videofonía, contrariando los 50% que los operadores proyectan para la misma fecha. Esto significa menos de un quinto de los clientes, según las cuentas de las operadoras móviles.

---

<sup>1</sup> Empresa privada localizada en Cambridge, Mass. identifica y analiza las tendencias emergentes, en tecnología y sus impactos en los negocios.



Tabla III. Diferencias entre Cdma2000 y WCDMA.

<b>Parámetro</b>	<b>Cdma2000</b>	<b>WCDMA</b>
Ancho de banda	1.25, 5, 10, 15, 20 MHz	1.25, 5, 10, 20 MHz
Estructura del canal de radio frecuencia para enlace descendente	Secuencia Directa (DS) o Multiportadora	Secuencia Directa (DS)
Velocidad de chip	1.2288/3.6864/7.3728/11.0593/14.7456 Mc/s para Secuencia Directa n x 1.2288 Mc/s (n=1, 3, 6, 9, 12) para Multiportadora	1.024/4.096/8.192/16.384 Mc/s
Longitud de la trama	20 ms para datos y control / 5 ms para control de información	10 ms/ 20 ms (opcional)
Modulación de ensanchamiento	QPSK Balanceado (enlace descendente) QPSK canal dual (enlace ascendente) Circuito complejo de ensanchamiento	QPSK Balanceado (enlace descendente) QPSK canal dual (enlace ascendente) Circuito complejo de ensanchamiento
Modulación de datos	QPSK (enlace descendente) BPSK (enlace ascendente)	QPSK (enlace descendente) BPSK (enlace ascendente)
Multi-velocidades	Ensanchamiento variable y multicódigo	Ensanchamiento variable y multicódigo
Factores de ensanchamiento	4-256	4-256
Traspaso	Traspaso ligero	Traspaso ligero

## II.4 ESTADO ACTUAL DE LOS SISTEMAS 3G

Después de mucha demora en los lanzamientos de las redes de tercera generación en toda Europa, Hutchinson-3G inauguró, el 3 de marzo de 2003, el sistema UMTS europeo. Sin embargo los principales defectos son la falta de calidad de la imagen, corta autonomía de las baterías y un área de cobertura que es geográficamente limitada e inconsistente. Además, el lanzamiento fue solo para clientes empresariales. Pero una cosa es cierta: la tercera generación, con o sin fallos, ya es una realidad en Europa [[Internet 1, 2003](#)].

Japón, el primer país que ofreció el servicio de tercera generación, ha alcanzado durante el año 2003 la cantidad de 320,000 usuarios a quienes ofrece ya servicio de videoconferencia y rápido acceso a WEB [[Internet 2, 2003](#)].

Actualmente en China el mercado de 3G está repartido en un 60% para WCDMA, CDMA 2000 con un 30% y 10 % para TD-SCDMA [[Internet 2, 2003](#)].

Brasil cuenta con tecnología CDMA2000 1x, la cual tiene la capacidad de manejar servicios de voz y datos con velocidades de hasta 153 kbps [[Internet 2, 2003](#)].

Con respecto a México, el Grupo Iusacell S.A. de C.V, operador de telecomunicaciones inalámbricas digital, anunció en este año la puesta en marcha de manera comercial de CDMA2000 1x para voz y redes de datos de alta velocidad. Incrementando su capacidad de voz y ofreciendo servicios de mensajes instantáneos de alta velocidad, e-mail y acceso a Internet hasta una velocidad de 144 kbps [[Internet 2, 2003](#)].

Por otra parte, la empresa de telefonía celular de España, Telefónica Movistar, pretende que México cuente con otra red de telefonía móvil, esta vez GSM. El proyecto consistiría en implementar una red GSM, en competencia con la ya existente CDMA. En principio, el proyecto contará con cobertura urbana únicamente, pero el proyecto prevé la expansión a todo el territorio nacional mexicano. El nuevo servicio también permitirá,

desde el inicio de su lanzamiento, el funcionamiento de la tecnología GPRS [[Internet 3, 2003](#)]

## **II.5 CONCLUSIONES**

Los sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación, o sistemas 3G, aparecerán con el fin de ampliar las capacidades de los sistemas actuales, principalmente posibilitando el desarrollo de servicios multimedia y un buen acceso a Internet. Para poder proporcionar la suficiente calidad de servicio se necesitan velocidades de transmisión elevadas y sistemas que presenten una elevada eficiencia espectral. Por este motivo, es necesario estudiar nuevas alternativas para obtener un sistema adaptativo capaz de ajustar los parámetros de transmisión a las necesidades concretas de la información a transmitir en un tráfico multimedia con garantía de calidad de servicio. Por lo tanto, en el siguiente capítulo se presenta el modelo del sistema en forma general que nos servirá para conocer la alternativa que estudiamos para lograr el objetivo de esta tesis.



---

## **III MODELO DEL SISTEMA PARA LAS DIFERENTES FASES DE OPERACIÓN EN UNA RED MÓVIL CELULAR 3G**

### **III.1 INTRODUCCIÓN**

En los sistemas de comunicaciones móviles el protocolo de acceso al medio (MAC) inicia con una petición de canal, en el cual el terminal móvil (TM) notifica a la estación base (EB) sus requerimientos. Con esta información la EB planifica la asignación equitativa de recursos para las diferentes peticiones, con el fin de garantizar la calidad de servicio. En este capítulo presentamos, en forma general, el modelo del sistema que proponemos en esta tesis para ubicar claramente los problemas a resolver, la inter-relación entre ellos y los elementos involucrados en el modelado, simulación y evaluación del sistema.

### **III.2 MODELO DEL SISTEMA PROPUESTO PARA REDES MÓVILES DE TERCERA GENERACIÓN**

El proceso de investigación seguido en el desarrollo de esta tesis se ilustra en la [Figura 6](#). A partir de esto, la estrategia de investigación ha sido dividida en cinco puntos:

1. Dada la aleatoriedad en el acceso y/o petición de recursos de un TM, se requiere de una técnica de acceso que permita establecer cierto control en la petición de recursos por parte de los TMs.

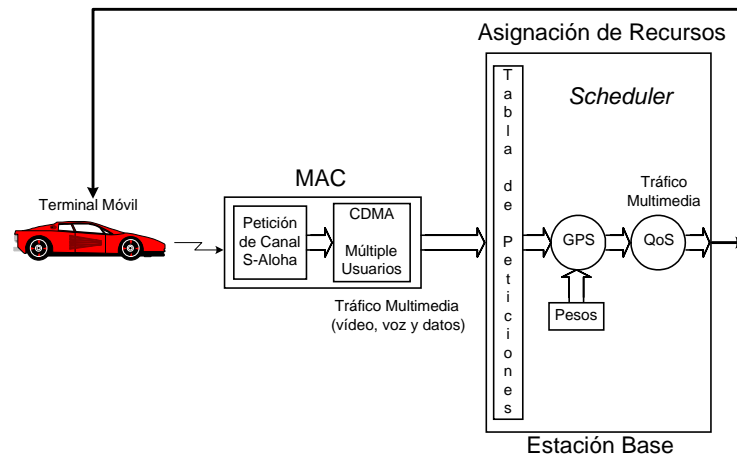


Figura 6. Modelo del sistema propuesto para redes móviles de tercera generación.

2. A partir de las restricciones impuestas en el punto anterior, investigar técnicas que mejoren la respuesta de la fase de acceso del TM en términos de: mayor eficiencia y estabilidad orientados a métricas tan importantes del sistema como: caudal eficaz y retardo de propagación.
3. Una vez optimizada la respuesta del sistema en la fase de petición de canal, ahora hay que referir esta fase a un entorno de múltiples usuarios simultáneos y múltiples servicios. Esta situación obliga a investigar técnicas de acceso al medio adaptables al tráfico y a la calidad de servicio (QoS) demandada.
4. Una vez resueltos los problemas relacionados con la fase de petición, ahora la problemática se centra en la fase de transmisión; es decir,
  - a) Cómo asignar los recursos del sistema.
  - b) Cómo garantizar la calidad de servicio demandada.
  - c) Cómo asegurar que los recursos del sistema en ningún caso se vean desbordados.
5. Todo lo anterior, referido a la plataforma UMTS, en la cual están perfectamente definidos los parámetros de calidad de servicio para las diferentes aplicaciones. Por último se aplica todo lo anterior a sistemas de tercera generación.

A partir de la estrategia anterior, de manera particular, la problemática asociada a cada punto es tratada en los siguientes apartados.

### **III.2.1 S-ALOHA COMO UN SUBCONJUNTO DE LA TÉCNICA MAC**

En comunicaciones móviles celulares el protocolo MAC lleva a cabo la comunicación entre el TM y la EB, inicia con una primera fase llamada canal de petición o canal RACH (Canal de Acceso Aleatorio), mediante la cuál el TM notifica a la EB sus requerimientos de comunicación. Dada la aleatoriedad en la presencia y demanda de servicios de usuarios móviles en la red inalámbrica, se requiere de una técnica MAC que controle de manera eficiente la posible interferencia entre TMs que simultáneamente emplee el canal RACH dirigida a la misma EB.

De acuerdo a lo anterior, se usa el protocolo Aloha ranurado (S-Aloha<sup>2</sup>) como canal RACH debido a que es un protocolo de tipo aleatorio, es simple en su estudio y ha sido utilizado desde los años 70s. Para modelar matemáticamente el canal RACH, se debe determinar el método más conveniente: EPA (análisis en punto de equilibrio) o cadenas de Markov. El modelado del canal RACH, ya sea por el método EPA, o bien por cadenas de Markov, es llevado a un ambiente de simulación a través de un programa en Lenguaje C. Los resultados obtenidos de esta simulación permiten determinar las limitaciones que presenta S-Aloha en términos de: paquetes transmitidos con éxito en una unidad de tiempo (caudal eficaz), tiempo promedio desde que se genera un paquete hasta que se transmite con éxito (retardo promedio) y respuesta de la técnica MAC a cambios en el tráfico de entrada (estabilidad). Este análisis será tratado detalladamente en el [Capítulo IV](#).

---

<sup>2</sup> En S-Aloha cuando dos o más TMs contienden al mismo tiempo por el canal, se produce una colisión. Esto trae como resultado que los TMs involucrados en la colisión no puedan transmitir y deben contender en la siguiente ranura de tiempo disponible.

### **III.2.2 MEJORAS A LA FASE DE PETICIÓN DE CANAL**

El segundo punto a tratar, de acuerdo a la estrategia de investigación, es mejorar las limitaciones que presenta S-Aloha. Para lograr esto, se incluye el efecto captura<sup>3</sup> en la presencia del canal radio y la distribución espacial de los TMs dentro de la celda. A partir de la adición de estos parámetros, el modelado matemático debe ser modificado y el resultado debe ser un aumento en la eficiencia del sistema (caudal eficaz). Además, en la misma fase de modelado se puede usar un algoritmo de retransmisión para estabilizar la respuesta del sistema. De esta manera se mejoran las limitaciones de S-Aloha, obteniéndose una fase de petición eficiente. Hay que mencionar que no solamente se requiere mejorar las limitaciones del sistema, sino también determinar aquellos aspectos que degradan en mayor medida la respuesta del sistema. El análisis exhaustivo de este punto se presenta en el [Capítulo V](#).

### **III.2.3 ENTORNO DE MÚLTIPLES USUARIOS SIMULTÁNEOS (S-ALOHA/DS-CDMA)**

Por otra parte, el tercer punto de la estrategia de investigación es dar servicio simultáneamente a varios TMs, en la misma región espectral. Por lo tanto, a la fase de petición de canal (S-Aloha) se le agrega ahora el entorno DS-CDMA (CDMA en secuencia directa en fase de transmisión). Esta adición da como resultado un sistema de comunicaciones móviles de tercera generación del tipo S-Aloha/DS-CDMA. El objetivo del sistema S-Aloha/DS-CDMA es tomar las ventajas que tiene por separado cada sistema. Con el entorno DS-CDMA las características más importantes que se agregan son: múltiples TMs transmitiendo simultáneamente, robustez ante interferencias y flexibilidad en el manejo de tráfico multimedia. El modelado, simulación y evaluación de este sistema se presenta en el [Capítulo VI](#).

---

<sup>3</sup> Cuando dos o más TMs hacen una petición de canal al mismo tiempo, estas peticiones colisionan por lo tanto la EB captura aquella señal que tenga mayor potencia y cumpla con un umbral.

La fase de modelado del sistema S-Aloha/DS-CDMA estudia varias posibilidades:

- a) Considera cuando el número de códigos de CDMA es mayor o igual que el número de TMs activos en el sistema.
- b) Aplicar una mayor velocidad de transmisión para que el TM transmita más información en la misma unidad de tiempo. Este control en la velocidad de transmisión debe ser capaz de adaptarse a las condiciones del tráfico en el canal. En la evaluación del modelo se consideran tres esquemas para aumentar la velocidad de transmisión: multi-modulación, multi-códigos y multi-ganancia de procesado. Lo anterior permite definir qué esquema es el más apropiado para esta tesis.
- c) Otra cuestión de interés para analizar es cuando hay más TMs que códigos disponibles, ya que este hecho representa un comportamiento real del sistema. Por lo tanto, el modelado de S-Aloha/DS-CDMA debe ser modificado de nuevo. Todo este modelado debe ser bajo un esquema de multi-velocidades, cuyo objetivo es lograr un control adaptable a las condiciones del tráfico en el canal.

Hasta este punto, sólo se ha abordado a resolver la problemática relacionada al acceso al recurso, por medio de un protocolo MAC (S-Aloha/DS-CDMA). Una vez que los TMs han pasado a la fase de transmisión de sus paquetes, se presenta un nuevo problema: cómo atender de manera eficiente los requerimientos de servicio de los TMs para tráfico multimedia. Esto es logrado a través de un algoritmo de asignación de recursos (*scheduling*), el cual debe además debe garantizar QoS para tráfico multimedia.

### **III.2.4 ASIGNACIÓN DE RECURSOS**

A lo largo de la literatura, los mecanismos de asignación de recursos se han desarrollado ampliamente para redes alámbricas [Zhan, 1995], pero estos mecanismos no pueden aplicarse directamente a redes móviles, debido a los problemas de movilidad y deterioros



en el canal inalámbrico, que es inherentemente dependiente del interfaz aire. Se han hecho esfuerzos con objeto de adaptar los esquemas de asignación de recursos a redes inalámbricas, pero estos nuevos esquemas han sido propuestos para una asignación de recursos en tiempo (los TMs sólo pueden transmitir con una velocidad constante), los cuales pueden ser aplicados solamente a redes TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo). Por lo tanto, se requiere esquemas de asignación de recursos donde los TMs puedan transmitir con diferentes velocidades (*rate scheduling*) que funcionen para redes CDMA de banda ancha (WCDMA).

Con la idea anterior, en este trabajo se propone un nuevo esquema de asignación de recursos: CDMA/GPS-DW (acceso múltiple por división de código/controlador centralizado con pesos dinámicos). En este nuevo esquema de asignación de recursos, la asignación de los recursos inicia desde el momento de asignar los códigos a los TMs. Por lo cual, se propone un control para administrar las peticiones de código, basado en los recursos disponibles en el sistema CDMA. Este control se ejecuta siempre que un TM inicia la comunicación (fase de petición de la etapa MAC), asegurando que la interferencia creada después de sumar una nueva petición no exceda un umbral específico (relación señal a interferencia) para un tráfico multimedia.

El esquema de asignación de recursos propuesto considera las siguientes propiedades:

- Asignación justa y equitativa de los recursos.
- Adaptable al tráfico.
- Maneja tráfico multimedia: vídeo, voz y datos.
- Garantiza la calidad de servicio.
- Control de las peticiones de código.
- Múltiples velocidades (*rate scheduling*).

Todo lo relacionado a la estrategia de investigación de este esquema de asignación de recursos, se presenta en detalle en el [Capítulo VII](#).

### III.2.5 CALIDAD DE SERVICIO GARANTIZADA PARA TRÁFICO MULTIMEDIA

Por último, el quinto punto de la estrategia de investigación es garantizar la QoS en términos de: paquetes descartados y retardo (esto es tratado en el [Capítulo VII](#)). Para lo cual, el algoritmo de asignación de recursos propuesto, debe ser llevado a un escenario de simulación. A través de esto, se determina si cumple con los límites superiores de QoS, de acuerdo al estándar UMTS. Para paquetes descartados, tanto para voz como vídeo, se requiere un 1% como máximo. Con respecto al retardo, los límites son 20 ms para voz, 150 ms para vídeo y 4 ms para datos (servicio WEB para datos). Además, este algoritmo debe garantizar la tasa de error para cada servicio:  $10^{-5}$  para vídeo,  $10^{-3}$  para voz y  $10^{-9}$  para datos. Para validar este algoritmo de asignación de recursos propuesto, éste se compara con CDGPS<sup>4</sup> (controlador centralizado por división de código), determinando si CDMA/GPS-DW presenta mejores prestaciones con respecto a CDGPS en términos de: porcentaje de paquetes descartados, retardo, caudal eficaz y capacidad (medido en número de TMs).

### III.3 CONCLUSIONES

En este capítulo se ha mostrado, en forma general, la estrategia de investigación llevada a cabo para el desarrollo de esta tesis. El objetivo de describir cada punto de la estrategia de investigación, fue con la idea de determinar en dónde se encuentran los problemas a resolver, qué relación hay entre cada etapa (MAC y asignación de recursos) y cómo validar el esquema propuesto.

---

<sup>4</sup> CDGPS fue propuesto en [Xu, 2002] y es aplicado para redes WCDMA bajo un esquema de múltiples velocidades (*rate scheduling*).



---

## IV. S-ALOHA COMO CANAL DE PETICIÓN (CANAL RACH)

### IV.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los campos de investigación de las telecomunicaciones que ha merecido mayor atención en los últimos 20 años, ha sido la resolución de colisiones en un canal multi-acceso móvil, es decir, resolver el acceso de múltiples TMs a un canal común para comunicarse [Steele, 1994]. Cuando un mismo recurso es susceptible de ser utilizado por varios TMs independientes entre ellos, aparece la necesidad de establecer un protocolo MAC a fin de gestionar y asignar el recurso escaso en cuestión. Si no se considerase ningún tipo de protocolo, podrían ocurrir conflictos cuando más de un TM quisiera acceder al recurso al mismo tiempo [Covarrubias, 1999].

En comunicaciones móviles celulares el protocolo MAC, empleado para la comunicación entre el TM y la EB, inicia con una primera fase llamada canal de petición o canal RACH (Canal de Acceso Aleatorio), mediante la cual el TM notifica a la EB sus requerimientos de comunicación; es decir, el tipo de servicio y el número de paquetes por transmitir. Con esta información la estación base planifica la asignación de recursos del sistema a las diferentes peticiones. Dicha planificación la realiza de manera dinámica en la base de ranura (*slot*) por ranura, y bajo algún algoritmo de asignación de recursos establece el procedimiento de la segunda fase: la transmisión, libre de contención, de la información por parte de los TMs. Es importante resaltar las características de aleatoriedad en el número de TMs, en la petición de servicios o en el número de traspasos, entre otras, presentes en un escenario de comunicaciones móviles. Por lo tanto, es necesario contar con una técnica

MAC que controle de manera eficiente la posible interferencia entre TMs que simultáneamente empleen el canal RACH dirigida a la misma EB. Es decir, la técnica MAC deberá evitar, o cuanto menos ser capaz de resolver, estos problemas y optimizar la petición del canal para tener una alta eficiencia (caudal eficaz - *throughput*) y un retardo promedio bajo.

Así pues, dentro de los sistemas de comunicaciones móviles celulares surge la necesidad de disponer de protocolos de acceso múltiple, cuyo objetivo es controlar el acceso de un conjunto de TMs a una serie de recursos compartidos. Estos protocolos esencialmente definen un conjunto de reglas de funcionamiento, para determinar cómo los MTs deben lograr el acceso a dichos recursos.

El objetivo de este capítulo es modelar S-Aloha como canal de petición y analizar sus deficiencias para poder mejorar posteriormente estas limitaciones y así tener un canal de petición eficiente.

## IV.2 MODELADO DEL CANAL RACH

Como se mencionó anteriormente, debido a que los procesos de llegada y de petición de recursos del TM son aleatorios, es necesario modelar matemáticamente el sistema para poder determinar los parámetros de operación asociados con el sistema de comunicaciones.

El modelado matemático de protocolos de acceso múltiple ha sido abordado mediante modelos estocásticos, que hacen uso de variables aleatorias de tipo Bernoulli y Poisson, y representan el acceso y fase de petición del TM mediante modelos de Markov [Kleinrock-1, 1975], [Bolch *et al.*, 1998]. Ha sido usual representar dichos fenómenos mediante cadenas de Markov multidimensionales, donde el número de la dimensión se incrementa conforme incrementa la complejidad del protocolo [Babich, 2000]. La distribución estacionaria de una cadena de Markov no tiene generalmente una forma

cerrada de la solución, especialmente en protocolos basados en contención. Ésta puede ser aproximada por técnicas numéricas, pero una solución numérica no es viable para protocolos complicados, así que ha sido necesario recurrir a otras técnicas analíticas de aproximación para analizar Cadenas Multidimensionales de Markov. La técnica EPA (*Equilibrium Point Analysis*) propuesta por [Fukuda, 1983] es una técnica analítica de este tipo. EPA es una técnica de aproximación que es aplicada solamente en estado estable, suponiendo que el sistema está siempre en un punto de equilibrio [Tasaka, 1986]. Además, EPA no requiere de calcular las probabilidades de estados de transición de la cadena de Markov. El punto de equilibrio de cualquier cadena de Markov compleja puede ser obtenido fácilmente resolviendo numéricamente cierto conjunto de ecuaciones no lineales.

Al utilizar Cadenas de Markov, el análisis de prestaciones para el canal RACH es exacto, en cambio con EPA es solo una aproximación. Además, de acuerdo a los resultados reportados en [Tasaka, 1983], [Tasaka, 1986] se indica que esta técnica es deficiente para el retardo y no puede utilizarse el teorema Central de Límite<sup>5</sup> para valores pequeños de TMs. Por lo tanto, el modelado del canal RACH se realiza a través de Cadenas de Markov.

---

<sup>5</sup> El Teorema Central de Límite asegura que cuando sumamos un número suficientemente grande de variables aleatorias independientes, sean cuales sean sus distribuciones estadísticas particulares, la variable aleatoria resultante tiende a ser Gaussiana.

## IV.2.1 ANÁLISIS DEL CANAL RACH A TRAVÉS DE CADENAS DE MARKOV

Para hacer más realista el modelo del canal RACH, se analiza el caso de un sistema con un número finito de TMs. Consideramos el caso en que el canal RACH es usado por un grupo de  $N$  TMs y cada uno con una memoria temporal de capacidad unitaria. Todos los paquetes son de igual longitud ( $T$ ) que es la duración de la ranura de tiempo.

A continuación se describe el modelo de transmisión utilizado por el canal RACH. Cada TM puede estar en uno de dos estados posibles: vacío o bloqueado [Rom, 1990]. En el estado vacío, el TM no tiene un paquete en su memoria temporal y no participa en alguna actividad de asignación de recurso. En este estado, el TM tiene una probabilidad de generación de paquete por cada ranura de tiempo de  $\phi$  y una probabilidad de no generación de un paquete en una ranura de tiempo de  $1-\phi$ ; la generación de un paquete es independiente de cualquier otra actividad. Lo anterior indica que la generación de paquete es un proceso independiente.

Una vez que un paquete es generado, su petición de transmisión es cursada inmediatamente en la siguiente ranura de tiempo. Si la transmisión tuvo éxito, el TM retorna al estado vacío y el proceso de generación de paquete inicia de nuevo. Si la transmisión no tiene éxito, el TM cambia a un estado de bloqueo y programa la retransmisión del paquete de acuerdo a una distribución geométrica independiente con parámetro  $\gamma$ . En otras palabras, en cada ranura de tiempo el TM retransmitirá el paquete con probabilidad  $\gamma$  y se abstendrá de hacerlo con una probabilidad  $1-\gamma$  [Kleinrock-2, 1975], mientras que en el estado de bloqueo, el TM no genera ningún nuevo paquete. Por último, un TM regresa al estado vacío cuando el paquete finalmente es transmitido con éxito.

Para efecto de análisis, las ranuras de tiempo del sistema son numeradas secuencialmente  $k=0, 1, \dots$  y  $\eta_s(k)$  denota el número de TMs bloqueados en el inicio de la  $k$ -ésima ranura de tiempo. La variable aleatoria  $\eta_s(k)$  es referida como el estado del sistema. El número de TMs bloqueados en el inicio de la  $(k+1)$ -ésima ranura de tiempo, depende del número de TMs bloqueados en el inicio de la  $k$ -ésima ranura de tiempo y el número de TMs que pasan de un estado a otro dentro de la ranura de tiempo. Ya que la transición de estado de los TMs es independiente de las actividades en cualquier ranura de tiempo previa, el proceso  $(\eta_s(k), k=0, 1, \dots)$  es una cadena de Markov. Debido a que el número de TMs en estado de bloqueo no puede exceder  $N$ , entonces la cadena es finita. De esta manera, como todos los estados se comunican, la cadena se puede considerar ergódica, lo que indica que existe una distribución de estado estable.

El diagrama de transición del sistema es mostrado en la [Figura 7](#). Las transiciones superiores son posibles entre cada estado y todos los estados de número más altos, por tanto una colisión entre cualquier número de paquetes es posible. Las transiciones inferiores son solamente posibles hacia el estado adyacente debido a que solamente un paquete puede ser transmitido con éxito en una ranura de tiempo. Al mismo tiempo, los estados bloqueados se reducen en una unidad. Note además la transición perdida del estado 0 a 1 la cual está limpia, debido a que si todos los TMs estuvieron en estado vacío y un solo TM generó y transmitió un paquete, éste no causará una colisión y por lo tanto no llega a estar en el estado de bloqueo.

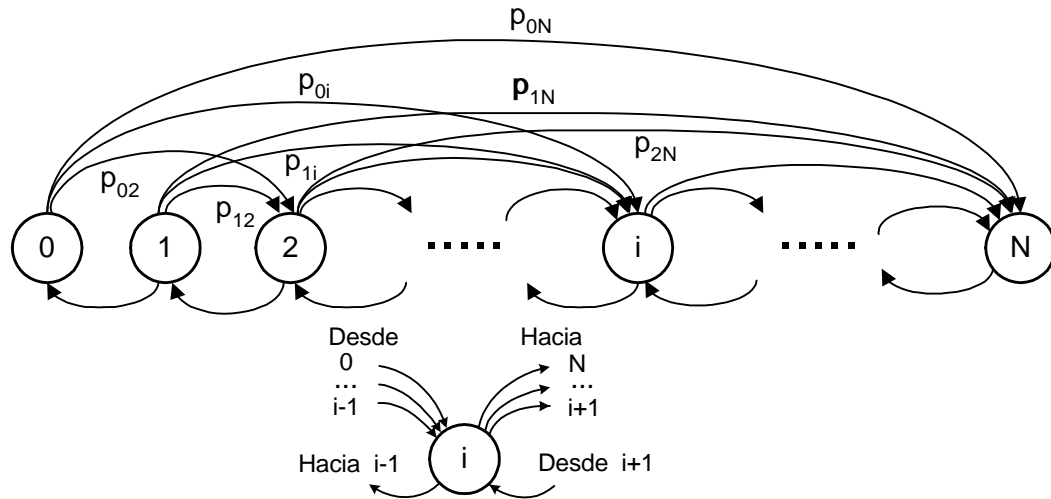


Figura 7. Diagrama de transición de estados para una población finita.

#### IV.2.2 PROBABILIDADES DE ESTADOS ESTABLES

Para el propósito de este análisis introducimos la siguiente nomenclatura. Sea  $\pi_i$  la probabilidad en estado estable del sistema estando en el estado  $i$ , esto es  $\pi_i = \lim_{k \rightarrow \infty} \Pr(\eta_s(k)=i)$ . Además,  $p_{ij}$  es la probabilidad de transición de estado estable, es decir,  $p_{ij} = \lim_{k \rightarrow \infty} \Pr(\eta_s(k)=j | \eta_s(k-1)=i)$  [Carleial, 1975]. Finalmente, denotamos por  $\mathbf{P}$  la matriz cuyos elementos son  $p_{ij}$  y por  $\boldsymbol{\pi}$  el vector renglón cuyos elementos son  $\pi_i$ . De lo mencionado anteriormente, el vector de probabilidad en estado estable es la solución al conjunto finito de ecuaciones lineales

$$\boldsymbol{\pi} = \boldsymbol{\pi} \mathbf{P}, \quad \sum_i \pi_i = 1. \quad (1)$$

El cual garantiza la existencia de una única solución [Kleinrock-1, 1975], [Bolch *et al.*, 1998]. Por eso debemos construir la matriz  $\mathbf{P}$  y derivar la solución deseada.

Debido a que el proceso de retransmisión de cada TM es un proceso geométrico independiente, la probabilidad que  $i$  TMs bloqueados retransmitan habiendo  $j$  TMs



bloqueados en una determinada ranura de tiempo, tiene una distribución binomial, expresada como

$$\Pr[i \text{ TMs bloqueados transmitan en un slot} / j \text{ TMs bloqueados}] = \binom{j}{i} \gamma^i (1-\gamma)^{j-i}. \quad (2)$$

De una manera similar, obtenemos para los TMs en estado vacío

$$\Pr[i \text{ TMs en estado vacío transmitan en un slot} / j \text{ TMs bloqueados}] = \binom{N-j}{i} \phi^i (1-\phi)^{N-j-i}. \quad (3)$$

Para poder construir la matriz  $\mathbf{P}$  se aplica las ecuaciones (2) y (3). Donde la explicación de todas y cada una de las transiciones posibles, ayuda a construir la matriz y obtener así la solución esperada.

1. Una transición del estado  $i$  al estado  $j < (i-1)$  es imposible e implica que  $p_{ij} = 0$  para estos casos.
2. Considere la transición del estado  $i$  al estado  $i-1$ . Esto indica una reducción en el estado de bloqueo, el cual es posible solamente si un solo paquete bloqueado fue transmitido y ningún paquete nuevo ha sido generado.
3. La transición desde el estado  $i$  hacia él mismo puede deberse a dos razones distintas. La primera es debida a que ningún nuevo paquete fue generado (y transmitido) mientras varios TMs bloqueados intentaban retransmitir. Los TMs bloqueados que retransmiten colisionan y permanecen en modo bloqueo; por otra parte, como no se intenta ninguna transmisión de nuevos paquetes, el número de TMs bloqueados no cambia. La segunda razón resulta de una situación en la cual ninguno de los TMs bloqueados intenta la retransmisión y un solo TM en modo vacío transmite. En este caso el TM transmite con éxito y por lo tanto el TM permanece en el estado vacío. Los dos casos anteriores se pueden resumir por la unión de dos eventos independientes: “Ningún TM bloqueado tiene éxito y ningún TM en estado vacío transmite” y “Ningún TM bloqueado intenta transmitir y solo un TM en estado vacío transmite”.

4. La siguiente transición a considerar es del estado  $i$  al estado  $i+1$ . Como se incrementó el estado bloqueo, alguna colisión habrá tenido lugar. Además, si el estado bloqueo se incrementa en una unidad, exactamente un TM en estado vacío intentó transmitir al mismo tiempo que al menos un TM en estado bloqueo.
5. El último caso es la transición del estado  $i$  al estado  $j > i+1$ . Aquí el estado bloqueo se incrementa por dos o más, indicando que  $j-i$  TMs en estado vacío han generado paquetes y han colisionado. La actividad de los TMs en estado bloqueo no es importante en este caso debido a que la colisión es generada solamente por las peticiones de los TMs en estado vacío.

Los casos anteriores los podemos resumir en la siguiente expresión [Kleinrock-2, 1975], [Carleial, 1975]

$$p_{ij} = \begin{cases} 0, & j < i-1, \\ \left[ i\gamma(1-\gamma)^{i-1} \right] (1-\phi)^{N-i}, & j = i-1, \\ \left[ 1 - i\gamma(1-\gamma)^{i-1} \right] (1-\phi)^{N-i} + \left[ (N-i)\phi(1-\phi)^{N-i-1} \right] (1-\gamma)^i, & j = i, \\ \left[ (N-i)\phi(1-\phi)^{N-i-1} \right] \left[ 1 - (1-\gamma)^i \right], & j = i+1, \\ \left[ \begin{matrix} N-i \\ j-i \end{matrix} \right] \phi^{j-i} (1-\phi)^{N-j}, & j > i+1. \end{cases} \quad (4)$$

Es fácil verificar que  $\sum_j p_{ij} = 1$ . Además, se nota que  $p_{01}$  es cero; este resultado es correcto debido a que una colisión tiene lugar cuando al menos dos TMs intentan transmitir, considerando que anteriormente ninguno de los TMs estaba en estado bloqueo, por lo que es imposible tener un solo TM bloqueado al final de la ranura de tiempo.

En su mayoría los trabajos realizados para el análisis de prestaciones del canal RACH contemplan dos parámetros: el caudal eficaz que es la fracción promedio de paquetes con éxito y el retardo promedio que es el tiempo desde que se genera un paquete hasta que se transmite con éxito.

Se ha incluido un tercer parámetro importante en las simulaciones que es el número de TMs bloqueados. Esto se presenta cuando un TM en estado vacío genera un paquete y trata de transmitirlo, pero si se produce una colisión los TMs en estado vacío envueltos en ésta pasan al estado bloqueo.

### IV.3 ANÁLISIS DE PRESTACIONES

#### IV.3.1 ANÁLISIS DEL CAUDAL EFICAZ

Para evaluar el caudal eficaz del sistema, considere que la fracción de tiempo que transporta información útil es igual a la fracción promedio de las ranuras de tiempo en una transmisión con éxito.

Para tener una ranura de tiempo con éxito ha de tener lugar solamente una única transmisión dentro del mismo. Esto indica que todos los TMs bloqueados permanecen en silencio y un nuevo TM transmite, o bien un solo TM bloqueado transmite mientras que ningún nuevo paquete es generado. Dado que hay  $i$  TMs bloqueados esto puede ser expresado como

$$P_{succ}(i) = \Pr(\text{slot con éxito} | i \text{ usuarios bloqueados}) = (1 - \gamma)^i (N - i)\phi(1 - \phi)^{N-i-1} + i\gamma(1 - \gamma)^{i-1}(1 - \phi)^{N-i}. \quad (5)$$

Por lo tanto, el caudal eficaz total es denotado como:

$$S = E[P_{succ}(i)] = \sum_{i=0}^N P_{succ}(i) \pi_i . \quad (6)$$

Cabe hacer notar que debido a que todos los TMs son estadísticamente idénticos, el caudal eficaz individual es dado por el valor de  $S$  de la [Ecuación \(6\)](#) dividida por  $N$ .

Como un caso especial, se considera la situación en la cual no necesita distinguir entre paquetes en estado bloqueo y nuevos paquetes generados, es decir,  $\gamma = \phi$ . Considerando la [Ecuación \(5\)](#) se obtiene

$$P_{succ}(i) = N\phi(1 - \phi)^{N-1} , \quad (7)$$

indicando que  $P_{succ}(i)$  es independiente de  $i$ . Este resultado, por supuesto, no sorprende debido a que si suspendemos la distinción entre TMs en estado bloqueo y vacío, no se puede esperar que la probabilidad de éxito dependa del número de TMs en estado bloqueo. Además, porque  $P_{succ}(i)$  es independiente de  $i$  se obtiene de la [Ecuación \(6\)](#) una expresión cerrada para el caudal eficaz:

$$\hat{S} = E[P_{succ}(i)] = N\phi(1 - \phi)^{N-1} . \quad (8)$$

Continuando con la consideración de no distinguir los TMs en estado bloqueo de los vacíos, se puede definir  $G$ , tráfico ofrecido, como el número medio de intentos de transmisión por cada ranura de tiempo, que para este caso es igual a  $N\phi$ . Sustituyendo este valor dentro de la ecuación del caudal eficaz dada en [Ecuación \(8\)](#), se obtiene

$$\hat{S} = G \left[ 1 - \frac{G}{N} \right]^{N-1} . \quad (9)$$

Bajo estas circunstancias y considerando que  $N$  puede ser infinito, se encuentra que en el límite la ecuación resulta  $\hat{S} = Ge^{-G}$ , que es un resultado idéntico para un esquema de canal RACH con población infinita [[Rom, 1991](#)]. Se puede concluir que el modelo de

población infinita es el límite del modelo de población finita; esto se presenta cuando no hay distinción entre TMs bloqueados y TMs vacíos, y/o cuando el número de TMs se incrementa forzando a que la razón de arribo promedio sea finita.

### IV.3.2 ANÁLISIS DEL RETARDO PROMEDIO

En la sección anterior se mencionó que el caudal eficaz es la razón media de salida de paquetes del sistema. Si el sistema es estable, entonces esta razón puede ser igual a la razón media de generación de nuevos paquetes. Cuando el sistema está en estado  $i$  hay  $N - i$  TMs vacíos cada uno generando paquetes en cada ranura de tiempo con probabilidad  $\phi$ . Así, la razón media de generación de nuevos paquetes en el estado  $i$  es  $(N - i)\phi$ . Tomando el promedio se obtiene

$$S = E[(N - i)\phi] = \sum (N - i)\phi\pi_i = (N - \eta_s)\phi, \quad (10)$$

donde  $\eta_s$  es el número promedio de TMs bloqueados.

Si se denota  $b$  la razón media en la cual los paquetes (TMs con paquetes) pasan a estado bloqueo; entonces de acuerdo al teorema de Little [Bertsekas, 1992], la cantidad media de tiempos perdidos en estado bloqueo es el número medio de TMs bloqueados respecto a los que pasan al estado bloqueo, o sea  $\eta_s/b$ . Definiendo también  $(S - b)/S$  como una fracción de los paquetes que no están más en estado bloqueo. Se puede definir el retardo medio como

$$\hat{D} = \frac{S - b}{S} \cdot 1 + \frac{b}{S} \left( \frac{\eta_s}{b} + 1 \right) = 1 + \frac{\eta_s}{S}. \quad (11)$$

Usando el valor de  $\eta_s$  de la Ecuación (10) se obtiene el retardo expresado como

$$\hat{D} = 1 - \frac{1}{\phi} + \frac{N}{S}. \quad (12)$$

Esta última ecuación expresa la relación caudal eficaz-retardo. Cabe hacer notar que esta representación es paramétrica debido a que  $\phi$  influye en el valor de  $S$ . El caudal eficaz primero se incrementa con  $\phi$ , hasta que se consigue la máxima capacidad, después de esto el caudal eficaz disminuye con el aumento de la carga. El retardo se incrementa monótonamente con la probabilidad de generación de paquetes  $\phi$ .

Considerando otra vez el caso especial en que  $\phi = \gamma$  por el cual el caudal eficaz viene dado por la [Ecuación \(10\)](#), al sustituirla en la [Ecuación \(12\)](#) se obtiene

$$\hat{D} = 1 + \frac{1 - (1 - \phi)^{N-1}}{\phi(1 - \phi)^{N-1}}. \quad (13)$$

Dos interesantes observaciones pueden hacerse con respecto al último resultado. Primero, manteniendo constante el producto  $N\phi$  e incrementando  $N$  muestra cada vez un incremento en el retardo. La segunda observación interesante relaciona al retardo esperado cuando  $\phi$  tiende a cero. Considerando el límite, se encuentra que  $\hat{D}(\phi \rightarrow 0) \rightarrow N$ , un resultado que puede parecer sorprendente a primera vista. Cuando  $\phi$  es muy pequeño, difícilmente tendrá lugar una colisión y en la mayoría de los casos el retardo será de una sola ranura de tiempo. De todas maneras si tiene lugar esto, el TM colisionado pasará al estado bloqueo y se mantendrá en este estado por un periodo de tiempo largo, debido a que el tiempo medio de espera para un paquete en estado bloqueo es inversamente proporcional a  $\phi$ . Tomando en cuenta todas estas características, se encuentra que la mayoría de los paquetes tienen un retardo unitario, pero pocos paquetes tienen retardos extremadamente largos, produciendo un retardo medio combinado de  $N$  ranuras de tiempo.

#### **IV.4 SIMULACIONES Y ANÁLISIS NUMÉRICO**

Después de presentar el modelado de canal RACH (canal de petición), éste es llevado a un escenario de simulación, el cual fue realizado por medio de un programa en lenguaje C

sobre una computadora personal, sin utilizar alguna herramienta de simulación comercial. Para lo cual, los parámetros de simulación considerados fueron los siguientes:

- Entorno celular: exteriores.
- Número de terminales móviles ( $N$ ): 80.
- La medida fundamental de análisis está basada en ranuras de tiempo (*slots*).
- Se supone que cada paquete puede estar contenido en la ranura de tiempo.
- Los paquetes de cada terminal son generados de acuerdo a un proceso de Bernoulli con probabilidades de generación de  $10^{-3}$  a 1. Para cada probabilidad de generación 10,000 ranuras han sido transmitidas con objeto de obtener los valores promedios.
- Un terminal no puede generar un nuevo paquete hasta que el paquete actual ha sido transmitido.
- La probabilidad de transmitir un paquete nuevo generado es 1, independientemente del valor actual de  $\gamma$ .

Las respuestas que se presentarán en las figuras siguientes consideran la simulación del comportamiento del canal RACH en cuanto al caudal eficaz, retardo promedio y número de terminales en estado bloqueo. El principal parámetro a considerar es el número de paquetes transmitidos con éxito en una unidad de tiempo (caudal eficaz); éste comportamiento en función de la carga ofrecida al canal es mostrado en la [Figura 8](#).

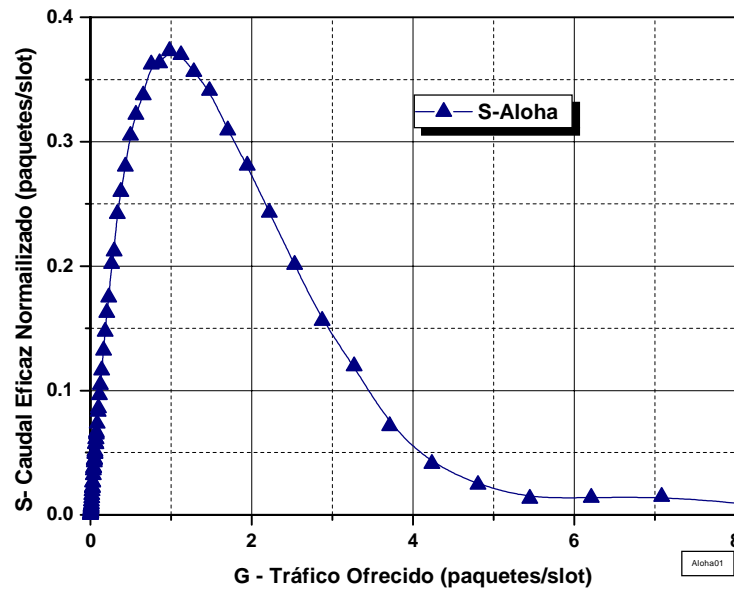


Figura 8. Comportamiento del caudal eficaz en el canal RACH.

De la [Figura 8](#) se puede visualizar que el valor del caudal eficaz máximo es obtenido cuando el tráfico ofrecido normalizado es 1 y cuyo valor de caudal eficaz es 0.368. Este valor es bajo debido a que cuando se presenta una colisión ningún terminal puede acceder al canal, y por consiguiente el caudal eficaz disminuye. Además, se observa que existen tres regiones: lineal, saturación y congestión. En la región lineal ( $0 \leq G < 0.8$ ), la relación de paquetes que entran y los paquetes que salen es 1. La región de saturación ( $0.8 \leq G < 1.2$ ) es cuando algunos paquetes que se generan llegan a salir. Y la región de congestión ( $G \geq 1.2$ ) se presentan cuando al aumentar el tráfico ofrecido al sistema se vuelve inestable debido a que se presentan demasiadas colisiones. Por lo que en el siguiente capítulo se tratará de estabilizar la respuesta de este sistema.

Otro parámetro importante a considerar es el retardo promedio, cuyo comportamiento se observa en la [Figura 9](#).



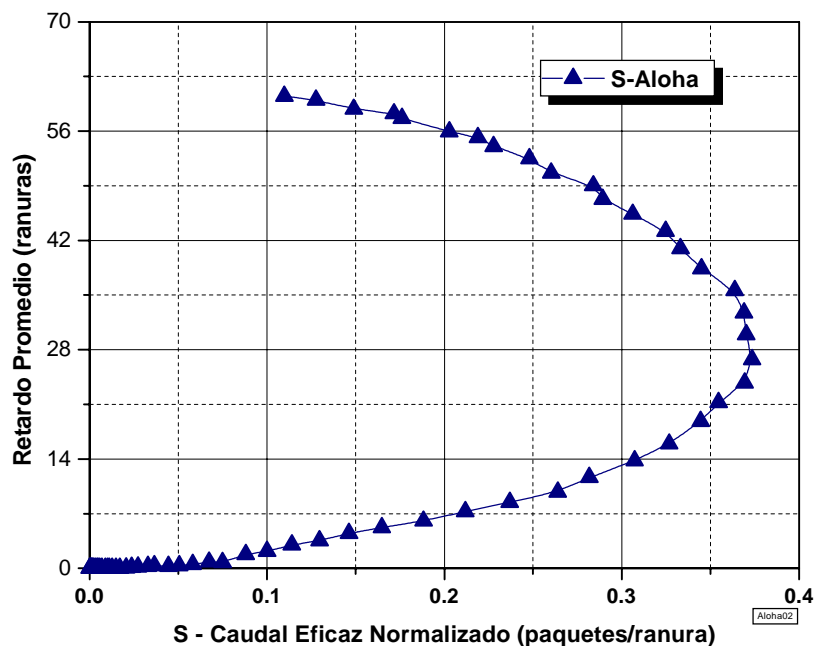


Figura 9. Comportamiento del retardo promedio en el canal RACH.

De la [Figura 9](#), se observa que el retardo promedio es elevado en la región de bajo tráfico y alcanza un máximo caudal eficaz en un valor de 27. Esto es debido a que cuando se presentan colisiones, el terminal retransmite hasta que tenga éxito su transmisión, provocando un retardo desde el momento que genera la información hasta que la transmite con éxito. Además, cuando se llega a un valor máximo de caudal eficaz y sigue aumentando el tráfico al canal, el retardo también aumenta.

Hasta este momento se han obtenido resultados con respecto al caudal eficaz y retardo, en el cual se presenta inestabilidad y valores elevados de retardo. En la [Figura 10](#) se muestra el comportamiento de un tercer parámetro que es el número de TMs en modo bloqueo.

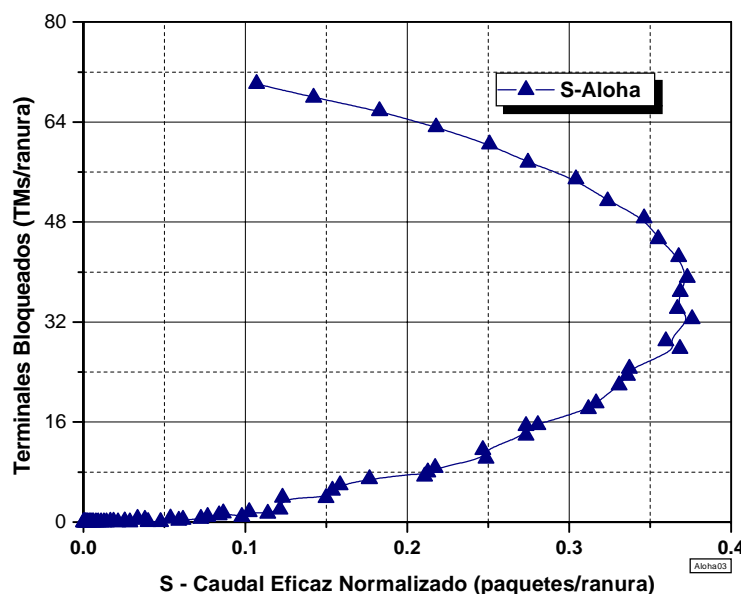


Figura 10. Comportamiento del número de terminales bloqueados.

De la [Figura 10](#) se observa que en la región de bajo tráfico el número de TMs en estado bloqueo es elevado, en el cual el número de terminales en estado bloqueo a un máximo caudal eficaz es 33 (más del 40% de número total de TMs), y conforme aumenta el tráfico, después de alcanzar el máximo caudal eficaz, el número de terminales en estado bloqueo se incrementa también. Esto es debido a que al presentarse colisiones los terminales quedan bloqueados, por lo que es necesario un algoritmo que sea capaz de resolver de una manera óptima y rápida las colisiones y así disminuir el número de terminales en estado bloqueo.

## IV.5 CONCLUSIONES

Hasta este momento se han obtenido resultados de las prestaciones de S-Aloha, los cuales presentan limitaciones: baja eficiencia e inestabilidad en la región de congestión ([Figura 8](#)) y un retardo alto ([Figura 9](#)) antes de alcanzar el máximo caudal eficaz. Por lo tanto, es necesario aplicar algoritmos de retransmisión o de técnicas de estabilización para que el

sistema sea estable. Con respecto al aumento de la eficiencia del sistema (caudal eficaz) es además necesario emplear el efecto captura. Es también necesario encontrar cuáles son los parámetros que más influyen en las prestaciones, para que de esta manera se tenga una técnica de petición de canal eficiente.

Por consiguiente, el análisis de cadenas de Markov hecho en este capítulo debe ser modificado para añadir el efecto captura, y un algoritmo de retransmisión para aumentar la eficiencia y la estabilidad del sistema, lo cual se lleva a cabo en el siguiente capítulo.



## **V. MEJORAS AL CANAL RACH: ALTA EFICIENCIA Y ESTABILIDAD**

### **V.1 INTRODUCCIÓN**

Hasta ahora el modelado realizado de S-Aloha como canal RACH en un entorno de comunicaciones móviles celulares se ha efectuado considerando un canal sin ruido, en el que todos los paquetes llegan al receptor con el mismo nivel de potencia tal y como lo plantean [Hajek, 1982], [Thomopoulos, 1988], [Carleial, 1975]. Bajo esta condición, cuando dos o más paquetes llegan al receptor simultáneamente, colisionarán y todos los paquetes involucrados en la colisión serán destruidos. Por otro lado, en un canal radio real los paquetes transmitidos experimentan no solo la presencia de ruido sino también de desvanecimiento, con lo cual el receptor puede fallar al detectar el paquete con desvanecimiento aún cuando no exista colisión. El hecho de que los paquetes lleguen al receptor con distintos niveles de potencia hace posible el efecto captura; es decir, la señal con mayor intensidad puede ser capturada por el receptor. Gracias a lo anterior la probabilidad de destrucción mutua de los paquetes que colisionan se reduce, por lo que resulta en un incremento en la eficiencia del sistema [Covarrubias, 1999].

Por lo tanto se puede mejorar la respuesta del canal RACH considerando el efecto captura, que a su vez depende de la distribución de los TMs. En este capítulo se estudia la probabilidad de captura en un escenario bajo la presencia de desvanecimientos, sombras y

distribución espacial de los TMs. Además, se emplea un algoritmo de retransmisión para estabilizar el sistema y de esta manera obtener una fase de petición de acceso eficiente.

## V.2 EFECTO CAPTURA

Un paquete deseado puede ser recibido con éxito, esto es, capturado por el receptor, en la presencia de otros paquetes trasladados o interferentes, si su potencia es mayor que la potencia del interferente por un cierto margen conocido como relación de captura del receptor ( $R$ ), [Wong, 1992], [Zorzi, 1994], [Sheikh *at al.*, 1990], [Zhou, 1998], [Onozato *et al.*, 1989], [Lau, 1992].

Si un paquete deseado se traslapa en tiempo con otro paquete, la probabilidad de captura  $P_{capt}(1)$  es dada por

$$P_{capt}(1) = \Pr\left(\frac{w_c}{w_{u1}} > R\right), \quad (14)$$

donde  $w_c$  es la potencia del paquete útil,  $w_{u1}$  es la potencia del paquete interferente, y  $R$  es la relación de captura. Un receptor con  $R=1$  se dice que tiene una captura perfecta, ya que puede recuperar el paquete deseado aún si su potencia es igual a la potencia del paquete interferente. Un receptor con  $R=\infty$  no puede capturar el paquete deseado aún si la potencia de interferencia se aproxima a cero.

En la presencia de  $I$  paquetes interferentes (cada uno con potencia  $w_{ui}$ ,  $i=1, 2, 3, \dots, I$ ), la probabilidad de captura es obtenida comparando  $w_c$  con la potencia total de interferentes, cuya expresión está dada como

$$P_{capt}(I) = \Pr\left(\frac{w_c}{\sum_{i=1}^I w_{ui}} > R\right), \quad I \geq 1. \quad (15)$$

Además, se presenta el caso cuando el paquete con la más alta potencia se va comparando uno a uno con los paquetes interferentes, entonces la probabilidad de captura está dada como

$$P_{capt}(I) = \Pr\left(\frac{w_c}{w_{ui}} > R, \quad \forall i, 0 < i \leq I\right). \quad (16)$$

Cuando todos los paquetes interferentes son independientes y si las distribuciones de estos son también idénticas, la [Ecuación \(16\)](#) puede ser escrita como

$$P_{capt}(I) = \left[ \Pr\left(\frac{w_c}{w_{u1}} > R\right) \right]^I. \quad (17)$$

### V.3 MODELADO DEL CANAL RACH CON EFECTO CAPTURA

Considerando el modelado realizado del caudal eficaz de canal RACH presentado en el [Capítulo IV](#), se añade ahora a éste el modelado del efecto captura. Se define la probabilidad de captura  $P_{cap}(i)$ , como la probabilidad de que uno de  $i$  paquetes que colisionaron sea recibido con éxito. Esto indica que  $i$  TMs, estando en el estado vacío o de bloqueo, transmiten en la misma ranura de tiempo y la EB recibe un paquete con éxito.

Bajo este nuevo esquema, las probabilidades de transición del estado  $i$  al estado  $j$  pueden ser determinadas a diferencia de [\[Bottcher, 1993\]](#), [\[Habbab, 1989\]](#), [\[Davis, 1980\]](#), por los siguientes cuatro casos [\[Mendez et al., 2002\]](#):

Caso 1:

$j < i - 1$ : La probabilidad de transición de estados es  $p_{ij} = 0$ , debido a que el número de TMs bloqueados no puede ser decrementado por más de uno porque el receptor puede capturar solamente un paquete por ranura de tiempo.

Caso 2:

$j=i-1$ : El estado disminuye en uno. Esto sucederá cuando  $i>0$  y ningún TM en estado vacío transmita y solamente un TM en estado de bloqueo es capturado con éxito.

Caso 3:

$j \geq i$ : Esto ocurrirá ya sea cuando  $j-i+1$  TMs en estado vacío transmiten y exactamente un TM es capturado con éxito; o  $j-i$  TMs en estado vacío transmiten y ningún paquete es capturado con éxito.

Caso 4:

$j=N$ : Donde el número final de TMs en estado de bloqueo es igual a  $N$ . Esto ocurrirá cuando  $N-i$  TMs en estado vacío transmiten y ningún paquete es capturado con éxito.

Las expresiones obtenidas para formar la matriz de probabilidad de transición de estados de acuerdo a los casos anteriores son las siguientes:

$$p_{ij} = \begin{cases} 0, & j < i-1, \\ (1-\phi)^{N-i} \sum_{c=1}^i \binom{i}{c} \gamma^c (1-\gamma)^{i-c} P_{capt}(c), & j = i-1, \\ 1_{\{N \geq j\}} \binom{N-i}{j-i+1} \phi^{j-i+1} (1-\phi)^{N-j-1} \sum_{k=0}^i \binom{i}{k} \gamma^k (1-\gamma)^{i-k} P_{capt}(k+j-i+1) + \\ \quad \binom{N-i}{j-i} \phi^{j-i} (1-\phi)^{N-j} \sum_{k=0}^i \binom{i}{k} \gamma^k (1-\gamma)^{i-k} [1 - P_{capt}(k+j-i)], & N \geq j \geq i. \end{cases} \quad (18)$$

Para el caso del efecto captura se seguirá el mismo planteamiento del [Capítulo IV](#), en el cual el vector de probabilidad de distribución estacionaria puede ser calculado resolviendo un conjunto de ecuaciones no lineales, las cuales al considerar el efecto captura hacen que la probabilidad de éxito en el estado  $i$  se represente ahora como

$$P_{succ}(i) = \sum_{r=0}^{N-i} \binom{N-i}{N-i-r} \phi^r (1-\phi)^{N-i-r} \sum_{c=0}^i \binom{i}{c} \gamma^c (1-\gamma)^{i-c} P_{capt}(c+r), \quad (19)$$

donde  $r$  y  $c$  son variables utilizadas para inicializar la sumatoria en el estado de generación y de retransmisión respectivamente.

El caudal eficaz  $S$ , considerando el efecto captura estará dado por:

$$S = E[P_{succ}(i)] = \sum_{i=0}^N P_{succ}(i) \cdot \pi_i \quad . \quad (20)$$

De acuerdo a las [ecuaciones \(18\)-\(20\)](#), se requiere determinar las probabilidades de captura ( $P_{capt}$ ). Estas probabilidades son obtenidas considerando un escenario definido por una distribución espacial de los TMs dentro de la célula, además de la presencia del canal radio caracterizado por desvanecimientos tipo Rayleigh y sombreado.

### **V.3.1 PROBABILIDAD DE CAPTURA CONSIDERANDO DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y EFECTO DEL CANAL RADIO**

En un canal de radio los paquetes transmitidos experimentan no solo la presencia de ruido sino también, múltiples reflexiones, desvanecimientos y sombras, con lo cual el receptor puede fallar al detectar el paquete aún cuando no exista colisión. Resulta entonces necesario caracterizar dichos efectos debido a la presencia del canal radio.

La propagación en el canal radio se describe mediante tres efectos:

- Atenuación de la señal como consecuencia de la distancia entre EB y TM.
- Sombreado debido a las variaciones sobre la señal transmitida.
- Desvanecimiento Rayleigh producto de las variaciones instantáneas de la señal.

La señal de radio que se transmite sufre desvanecimientos debido a obstáculos en su trayectoria de propagación, en cuyo caso la potencia de la señal se puede caracterizar mediante una función de densidad de probabilidad (pdf) del tipo log-normal [[Rappaport](#),



2001]. Además, debido a la propagación por trayectorias múltiples, la señal se ve afectada por desvanecimientos que siguen una pdf de tipo Rayleigh [Linnartz, 1993].

Debido a la propagación por trayectorias múltiples la señal se ve afectada por fluctuaciones de tipo Rayleigh. Esto supone que la envolvente instantánea de la señal recibida tenga una distribución tipo Rayleigh, donde la potencia de la señal  $w_c$  está distribuida exponencialmente mientras que su valor medio  $W_c$  es una distribución log-normal. La densidad de probabilidad condicional es

$$p(w_c | W_c) = \frac{1}{W_c} \exp\left(-\frac{w_c}{W_c}\right), \quad w_c > 0, \quad (21)$$

y la pdf de  $W_c$  es dada por

$$p(W_c) = \frac{U}{W_c} \exp\left(-\frac{(\log W_c + A)^2}{2\sigma^2}\right), \quad W_c > 0. \quad (22)$$

donde  $U = \frac{\log e}{\sqrt{2\pi}\sigma}$ ,  $A = \log W_0 + \frac{\sigma^2}{2\log e}$ , y  $W_0$  es el valor medio de  $w_c$ ,  $\sigma$  es la desviación estándar en dB, y  $\log$  está dado en base 10.

Por lo tanto, usando las ecuaciones (21)- (22) se obtiene, usando el Teorema de Bayes:

$$p_{w_c,r}(w_c) = \int_0^{\infty} p(w_c | W_c) p(W_c) dW_c, \quad (23)$$

entonces

$$p_{w_c,r}(w_c) = \int_0^{\infty} \frac{1}{W_c} \exp\left(-\frac{w_c}{W_c}\right) \cdot \frac{U}{W_c} \exp\left(-\frac{(\log W_c + A)^2}{2\sigma^2}\right) dW_c. \quad (24)$$

Haciendo un cambio de variable de la ecuación anterior  $u = \frac{1}{W_c}$ , se obtiene

$$p_{w_c,r}(w_c) = \int_0^{\infty} U \cdot \exp(-uw_c) \cdot \exp\left(-\frac{(A - \log u)^2}{2\sigma^2}\right) du. \quad (25)$$

A este análisis hay que incluirle el modelo de distribución espacial que mejor se ajusta a la movilidad de los TMs. Debido a la diferente distribución de los TMs alrededor de la EB, el comportamiento del sistema será diferente. La distribución espacial influye en el análisis del sistema, ya que la potencia de cada paquete que llega a la estación base es proporcional a la distancia a la cual se encuentra de la misma.

De acuerdo a [Covarrubias-1 *et al.*, 1998], la diferencia en las prestaciones de S-Aloha al considerar distribuciones espaciales del tipo uniforme y no uniforme (particularmente del tipo Bell-Shaped) son mínimas (del orden del 6%), por lo que dada la facilidad de tratamiento matemático emplearemos en nuestro modelado una distribución uniforme.

En una distribución uniforme, la densidad de tráfico espacial está distribuida uniformemente alrededor de la EB y por lo tanto el número de TMs por unidad de área es constante (no depende de la distancia a la estación base) [Covarrubias-2 *et al.*, 1998].

La función de densidad de probabilidad correspondiente a la distribución de la distancia  $y$  entre un TM y la EB es

$$p_y(y) = 2y, \quad 0 \leq y \leq 1. \quad (26)$$

De acuerdo a [Kim, 1998], la función de densidad de probabilidad para la potencial de la señal  $w_c$  suponiendo los efectos del canal radio (Rayleigh y sombreo) y la distribución espacial de los TMs es

$$p_{w_c}(w_c) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} B \cdot \exp(-uw_c) \cdot \exp\left(-\frac{(A - \log u)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot p_y(y) \cdot du dy \quad (27)$$

Con objeto de obtener la probabilidad de captura considerando una distribución espacial uniforme y los efectos del canal (desvanecimiento Rayleigh y sombreado), se considera  $\Pr\left(\frac{w_c}{w_{ul}}\left(\frac{r_{ul}}{r_c}\right)^\delta > R\right)$ . Esto es debido a que la potencia de la señal recibida en la EB de cada TM es afectada por las pérdidas por propagación [Rappaport, 2001], donde el parámetro  $\delta$  es el factor de pérdidas. En esta tesis usamos  $\delta=4$  [Linnartz, 1989], considerando que el paquete deseado y el paquete interferente son transmitidos por TMs con distancias igual a  $r_c$  y  $r_{ul}$  desde la EB, respectivamente, donde  $r = \frac{r_c}{r_{ul}}$ . El paquete interferente llega al receptor con una potencia  $w_{ul}$ , media local  $W_{ul}$  y siendo  $W_o$  como el valor medio de  $w_c$ .

La probabilidad de que el receptor capture el paquete sobre los  $I$  paquetes interferentes considerándolos independientes e idénticos es

$$P_{capt}(I) = \left[ \Pr\left(\frac{w_c}{w_{ul}}\left(\frac{r_{ul}}{r_c}\right)^4 > R\right) \right]^I = \left[ \Pr(w_c > R w_{ul} r^4) \right]^I,$$

$$P_{capt}(I) = \left[ \int_0^\infty \int_0^\infty \left\{ \int_{Rxy^4}^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty U \cdot \exp(-zw_c) \cdot \exp\left(-\frac{(A - \log z)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot p_y(y) \cdot dz dy dw_c \right\} \right]^I,$$

$$\int_0^\infty \int_0^\infty U \cdot \exp(-xu) \cdot \exp\left(-\frac{(A - \log u)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot p_y(y) \cdot du dy dx$$

$$P_{capt}(I) = \left[ \int_0^\infty \left\{ \int_0^\infty \int_0^\infty U \cdot \frac{1}{z} \exp(-Rxy^4z) \cdot \exp\left(-\frac{(A-\log z)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot p_y(y) \cdot dzdy \right\} \right]^I,$$

$$\left[ \int_0^\infty \int_0^\infty U \cdot \exp(-xu) \cdot \exp\left(-\frac{(A-\log u)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot p_y(y) \cdot dudyx \right]$$

$$P_{capt}(I) = \left[ \int_0^\infty \left\{ \int_0^\infty \int_0^\infty U \cdot \frac{1}{z} \exp(-Rxy^4z) \cdot \exp\left(-\frac{(A-\log z)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot p_y(y) \cdot dzdy \right\} \right]^I,$$

$$\left[ \int_0^\infty \int_0^\infty U \cdot \exp(-xu) \cdot \exp\left(-\frac{(A-\log u)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot p_y(y) \cdot dudyx \right]$$

debido a que se supone una distribución uniforme, los límites de las integrales deben modificarse ya que deben ser de 0 a 1. Por lo tanto, la ecuación anterior queda como

$$P_{capt}(I) = \left[ \int_0^\infty \left\{ \int_0^1 \int_0^1 U \cdot \frac{1}{z} \exp(-Rxy^4z) \cdot \exp\left(-\frac{(A-\log z)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot p_y(y) \cdot dzdy \right\} \right]^I. \quad (28)$$

$$\left[ \int_0^1 \int_0^1 U \cdot \exp(-xu) \cdot \exp\left(-\frac{(A-\log u)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot p_y(y) \cdot dudyx \right]$$

Esta última [ecuación](#) es la probabilidad de captura considerando una distribución espacial uniforme y los efectos del canal (desvanecimiento Rayleigh y sombreado).

Hasta este momento, se ha hecho el análisis del efecto captura para aumentar la eficiencia del sistema. A continuación se presenta la estabilización del sistema para que de esta manera se obtenga una fase de petición de canal RACH más eficiente.

## V.4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

La estabilidad es otro parámetro de vital importancia en las prestaciones del canal RACH dentro de un escenario de comunicaciones móviles, considerada como la respuesta de la técnica MAC a cambios en el tráfico de entrada. A partir de la respuesta típica de S-Aloha mostrada en la [Figura 8](#), se puede observar que la respuesta al emplear un algoritmo con una probabilidad de retransmisión constante, es fuertemente inestable a medida que el tráfico aumenta. Dada la relación directa entre estabilidad y algoritmo de retransmisión del protocolo MAC, lo que se busca es definir un algoritmo que emplee un control dinámico de las probabilidades de retransmisión; es decir, un algoritmo que se adapte a las condiciones cambiantes de tráfico en el canal RACH y por lo tanto mejore la capacidad del sistema en el manejo de tráfico.

Existen diversas técnicas que estabilizan dicha respuesta, ya sea por métodos puramente analíticos, o bien empleando técnicas que modelan el canal de acuerdo al resultado de ciertos eventos, controlando dinámicamente dicha probabilidad de retransmisión. Dentro de esta última opción, las técnicas que presentan mejor respuesta, son aquellas que consideran un canal de retorno como se reporta en [\[Mendez y Covarrubias, 2001\]](#), donde se hace un análisis comparativo de prestaciones usando el canal de retorno [\[Jeong, 1995\]](#) y sin hacer uso de éste [\[Bing, 1998\]](#), [\[Bing, 1999\]](#), [\[Bing, 2000\]](#). Tales técnicas, con canal de retorno, fundamentan la adaptabilidad de dicha probabilidad, considerando el número de TMs en estado bloqueo o TMs con paquetes que retransmitir.

En dichas técnicas se considera un estado ternario (vacío, éxito y colisión) de respuesta del canal RACH, tal y como se muestra en la [Figura 11](#). Cuando el TM no ha generado algún paquete, éste permanece en el estado vacío (IDLE) y por lo tanto la información de retorno indicará que hubo un vacío. En el momento que es generado un paquete, el TM entra a un estado activo (ACTIVE), donde pueden ocurrir dos eventos, el primer evento es que se presente un éxito en la transmisión, por lo cual tiene una transición al estado IDLE, en caso de que no tenga más paquetes que transmitir. El segundo evento es

cuando ocurre una colisión y la transmisión no tiene éxito, entonces el TM hará una transición al estado bloqueo (BCKL) donde permanecerá hasta que transmita con éxito.

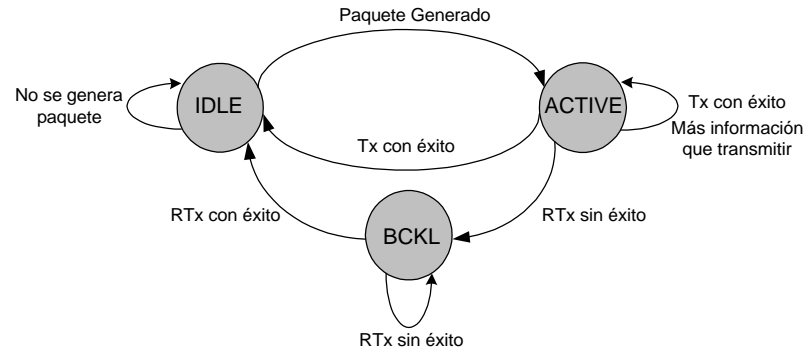


Figura 11. Transición de estados de para una información ternaria.

De acuerdo a la información ternaria (vacío, éxito y colisión) que proporciona dicho canal de retorno, se modela el algoritmo de retransmisión. Con dicha información el algoritmo de retransmisión tiene la capacidad de ejercer un cierto control de carga ofrecida al canal, realizando en el inicio de cada ranura de tiempo una estimación de carga denotada como  $\hat{n}$  [Bertsekas, 1992], [Rivest, 1987]. Bajo estas circunstancias, cada paquete bloqueado es entonces retransmitido con una probabilidad  $\gamma(\hat{n}) = \min\left(1, \frac{1}{\hat{n}}\right)$ . A manera de ejemplo, si el canal de retorno informara la existencia de una colisión, y si inicialmente el estimador  $\hat{n}$  tuviese asignado un valor pequeño, dicho estimador tendría que incrementar su valor en la siguiente ranura de tiempo, caso contrario sucedería con canal vacío.

Dado que todos los TMs están atentos en la información que proporciona el canal de retorno, en la ranura de tiempo  $k+1$  cada TM independientemente ejecuta una actualización de su estimador  $\hat{n}$  de acuerdo a

$$\hat{n}_{k+1} = \hat{n}_k + \begin{cases} est\_i, & \text{si en el slot } k \text{ hubo un estado vacío,} \\ est\_s, & \text{si en el slot } k \text{ hubo un éxito (estado activo),} \\ est\_c, & \text{si en el slot } k \text{ hubo una colisión (estado bloqueado),} \end{cases} \quad (29)$$

donde  $est\_i$ ,  $est\_s$ ,  $est\_c$  son definidos como

$$est\_i = 2 - exp(1), \quad est\_s = 2 - \frac{exp(1)}{1 - p_e}, \quad est\_c = 2. \quad (30)$$

siendo  $p_e$  la probabilidad que el paquete no sea aceptado por el receptor.

Con estos valores es posible calcular en forma dinámica el valor del estimador y así tener un control de la carga del sistema; pero sobre todo, es posible definir una probabilidad de retransmisión variable y/o adaptable de manera dinámica a las condiciones imperantes en el canal RACH. El resultado de todo ello es operar con un algoritmo de retransmisión del tipo binario exponencial [Jeong, 1995] que nos permite estabilizar la respuesta de S-Aloha, tal y como se verá en el apartado V.5.

Hasta aquí hemos podido analizar S-Aloha como canal RACH, modelando a través de Cadenas de Markov las prestaciones del sistema para un canal libre de errores. Además se consideró el efecto captura para una distribución de tipo uniforme tomando en cuenta los efectos del canal utilizando el mismo procedimiento. Posteriormente se hizo el análisis para estabilizar el sistema, utilizando para esto un algoritmo capaz de manejar dinámicamente las probabilidades de retransmisión a través del uso de la información ternaria de retorno. Todo este análisis es llevado a un proceso de simulación para determinar aquellos aspectos que degradan en mayor medida la respuesta del sistema y esto se presenta a continuación.

## V.5 ANÁLISIS NUMÉRICO Y RESULTADOS

Para el proceso de simulación se ha usado un emulador en tiempo real (RTE) [Covarrubias-3 *et al*, 1998] realizado por medio de un programa en lenguaje C sobre una computadora personal, sin utilizar herramientas de simulación comercial. En el RTE las cadenas de Markov, basadas sobre el modelo oculto de Markov (HMM), han sido seleccionadas para reproducir el comportamiento de las estadísticas del canal radio. En este proceso discreto de simulación, los paquetes de cada TM son generados de acuerdo a un proceso de Bernoulli, con probabilidades de generación de  $10^{-3}$  a 1. Han sido transmitidos 10,000 paquetes para cada probabilidad de generación, donde cada paquete está contenido en una ranura de tiempo y un nuevo paquete es transmitido con una probabilidad de 1, independientemente del valor actual de  $\gamma$  (probabilidad de retransmisión). También se asume que un TM no puede generar un nuevo paquete hasta que el actual paquete ha sido transmitido. La [Tabla IV](#) muestra los parámetros considerados en la simulación.

Tabla IV. Parámetros de simulación para el canal RACH.

Parámetro	Valor
Número de TMs - $N$	80
Desviación estándar para exteriores - $\sigma$	5 dB
Factor de pérdidas por propagación - $\delta$	4
Potencia de transmisión de cada TM	125 mW

En esta presentación de resultados, los parámetros descritos en este capítulo se irán incluyendo de manera gradual donde el primer parámetro a simular del canal RACH es el caudal eficaz.



## V.5.1 COMPORTAMIENTO DEL CAUDAL EFICAZ

En la [Sección V.5.1.1](#) se analiza el comportamiento del caudal eficaz considerando la distribución espacial y efecto captura para diferentes valores de relación de captura. En la [Sección V.5.1.2](#), el efecto del canal radio es incluido para determinar cómo afecta en las prestaciones del sistema.

### V.5.1.1 Distribución espacial uniforme (DEU) de los TMs y efecto captura (EC)

En la [Figura 12](#) se muestra la respuesta del canal RACH considerando una distribución espacial uniforme de los TMs y el efecto captura, sin tomar en cuenta el efecto del canal radio. El parámetro  $R$  indica la relación de captura la cual es variada de una relación de captura casi perfecta ( $R=2$ ) hasta captura imperfecta ( $R=10$ ) [[Covarrubias-1 et al., 1998](#)].

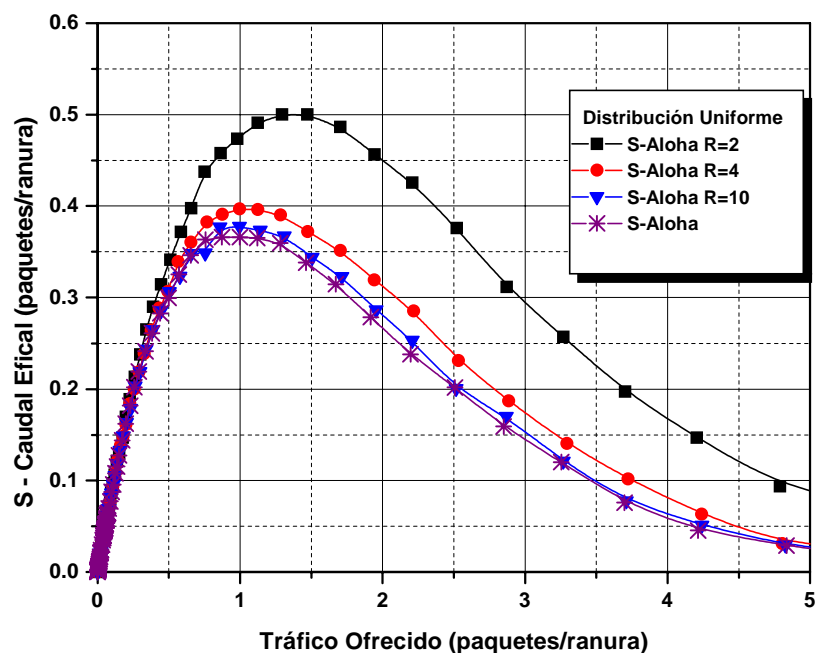


Figura 12. Comportamiento del caudal eficaz con una distribución uniforme.

En la [Figura 12](#) se observa la influencia de la relación de captura  $R$  en el comportamiento del caudal eficaz. Para el caso de una captura casi perfecta<sup>6</sup>,  $R=2$ , el caudal eficaz presenta la mejor respuesta, alcanzando un valor de 0.50; es decir, un incremento del 38% con respecto a la respuesta típica de S-Aloha. Al incrementar la relación de captura, provoca que la señal deseada requiera más potencia que la interferencia total para que de esta manera el paquete pueda ser capturado por la EB. Esto da como resultado un decremento en el caudal eficaz. Cuando  $R=10$  su respuesta tiende al valor de S-Aloha con canal ideal (canal libre de errores), por lo que a valores de relación de captura mayores a 10 el comportamiento del caudal eficaz tiende a alcanzar el valor de S-Aloha con canal ideal. Para los siguientes resultados solo consideramos una relación de captura de 2 ( $R=2$ ), debido a que ésta presenta mejores resultados. Además, la respuesta típica de S-Aloha con canal ideal será usada como una referencia.

#### ***V.5.1.2 Distribución espacial uniforme (DEU), efecto captura (EC) y efecto del canal radio (ECR)***

Hasta este momento solo se ha contemplado una distribución uniforme, en el caso de desvanecimiento debido a trayectorias múltiples de la señal (Rayleigh) y a las variaciones sobre la señal transmitida provocada por obstáculos (sombreo). El comportamiento de éstas se muestran en la [Figura 13](#), donde se nota que la adición del canal radio (Rayleigh y sombreado) incrementa la probabilidad de captura comparado al caso donde no es considerado el canal radio (ver [Figura 12](#)); esto es debido a que con el efecto del canal radio la probabilidad de que la petición de un TM sobreviva a una colisión es alta, ya que de acuerdo a [[Zorzi, 1994](#)] el efecto del canal provoca que aumente la potencia recibida del paquete y como consecuencia tiene mayor probabilidad de que sea recibido con éxito.

---

<sup>6</sup> No se considera  $R=1$  (captura perfecta) porque es un caso improbable.

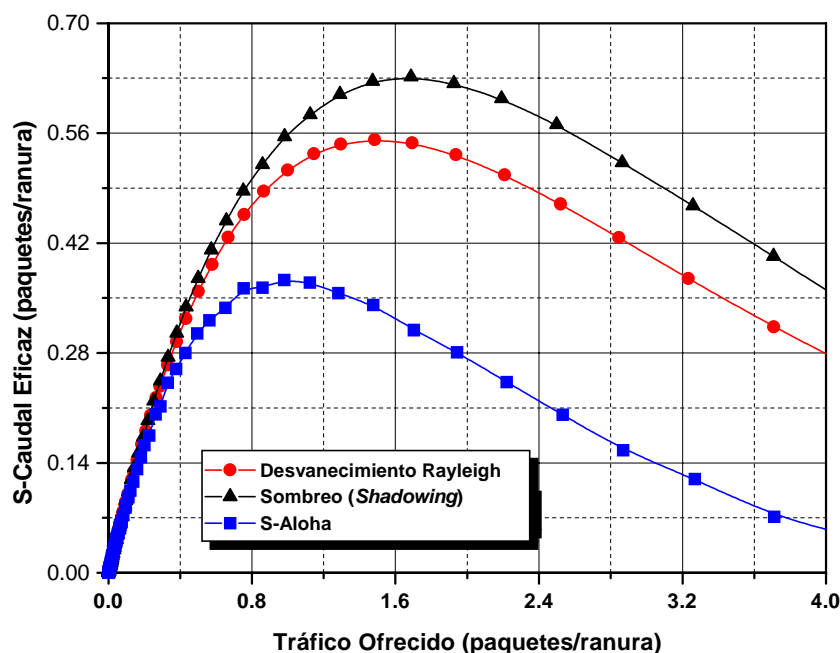


Figura 13. Comportamiento del caudal eficaz considerando los efectos de canal (Rayleigh y sombreado).

En la [Figura 13](#), se observa que en cualquier caso, la respuesta del caudal eficaz mejora substancialmente cuando se considera los efectos del canal radio. En el caso del desvanecimiento Rayleigh se tiene un caudal eficaz máximo de 0.55, es decir, un aumento en el valor del 50% comparado con el caso de S-Aloha teórico. Además, el valor máximo (0.55) es mayor con respecto al resultado obtenido, si solo se considera una distribución uniforme (0.5). Para el caso de sombreado, el caudal eficaz alcanzado es 0.63 que representa un 70% de aumento con respecto al valor de S-Aloha teórico. Este incremento en el caudal eficaz es como consecuencia del aumento en el valor de las probabilidades de captura, debido a que son considerados los efectos del canal y la distribución espacial de los TMs, esto da como resultado un incremento en la probabilidad de éxito. Además, los resultados indican que para una relación de captura dada el canal RACH es altamente sensible al efecto por sombreado. Por todo lo anterior, concluimos que al utilizar el efecto captura la eficiencia del sistema aumenta, restando por presentar ahora el algoritmo dinámico de estabilización.

## V.5.2 COMPORTAMIENTO DE LA ESTABILIDAD

### V.5.2.1 Comportamiento del caudal eficaz con estabilidad

El otro parámetro de interés en esta tesis es mejorar la estabilidad del canal RACH; es decir, incrementar la capacidad del sistema en el manejo del tráfico. Por consiguiente, un algoritmo de retransmisión es usado en la simulación. Este algoritmo es adaptable a las condiciones de tráfico en el canal. La [Figura 14](#) muestra la respuesta del caudal eficaz de S-Aloha, como un canal RACH, usando un algoritmo dinámico de estabilización que modifica la probabilidad de retransmisión de aquellos TMs bloqueados, considerando también el efecto captura para una distribución uniforme de los TMs, una relación de captura  $R=2$  y los efectos combinados del canal (Rayleigh y sombreado).

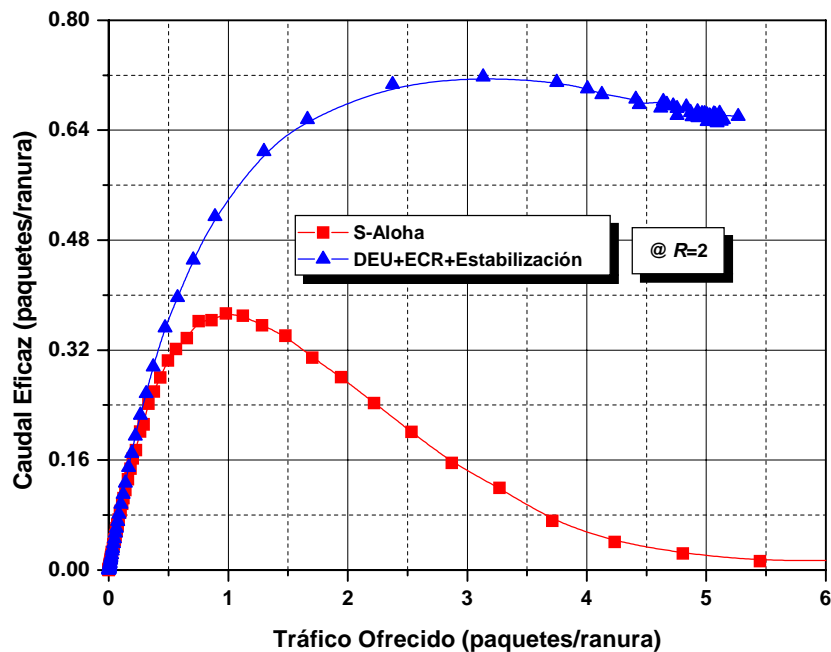


Figura 14. Comportamiento del caudal eficaz mejorando la respuesta de estabilidad y eficiencia.

En la [Figura 14](#) se observa que el caudal eficaz se mejora cuando son usados el efecto captura (EC), los efectos del canal radio (ECR), la distribución espacial de los TMs y la estabilización a través de las probabilidades de retransmisión. Estos efectos ayudan al sistema en obtener una alta eficiencia (arriba del 70%) y estabilidad cuando se maneja un alto tráfico. También, hay un mejor comportamiento en el manejo del tráfico ofrecido, ya que cuando el tráfico del sistema aumenta el valor del caudal eficaz permanece constante (aproximadamente 0.65), esto es debido a que presenta un efecto de control de carga. Se puede explicar que este comportamiento dado que se usa un canal de retorno para indicar el estado del canal, permitiendo así controlar dinámicamente las probabilidades de retransmisión. El algoritmo de retransmisión es del tipo exponencial, el cual indica que si la información de retorno es un estado vacío, el TM se dará cuenta que la probabilidad de retransmisión tiene un valor bajo, y con dicha información aumentará el valor de la probabilidad de retransmisión. En otras palabras, si hubo una colisión, el valor de la probabilidad de retransmisión debe ser disminuido. Con esto pueden ser aseguradas las mejores prestaciones del canal RACH en un sistema de comunicaciones móviles celulares, cumpliendo así con los requerimientos establecidos previamente en el caso de los sistemas móviles de tercera generación.

#### ***V.5.2.2 Comportamiento del número de TMs bloqueados con estabilidad***

De acuerdo a nuestro modelo y simulación, y como una consecuencia del algoritmo de retransmisión (dinámico y adaptable a las condiciones del tráfico), se puede determinar el número de TMs bloqueados (TMs que sus peticiones colisionaron antes y que tienen paquetes para transmitir) como un parámetro importante. El comportamiento de este parámetro es mostrado en la [Figura 15](#).

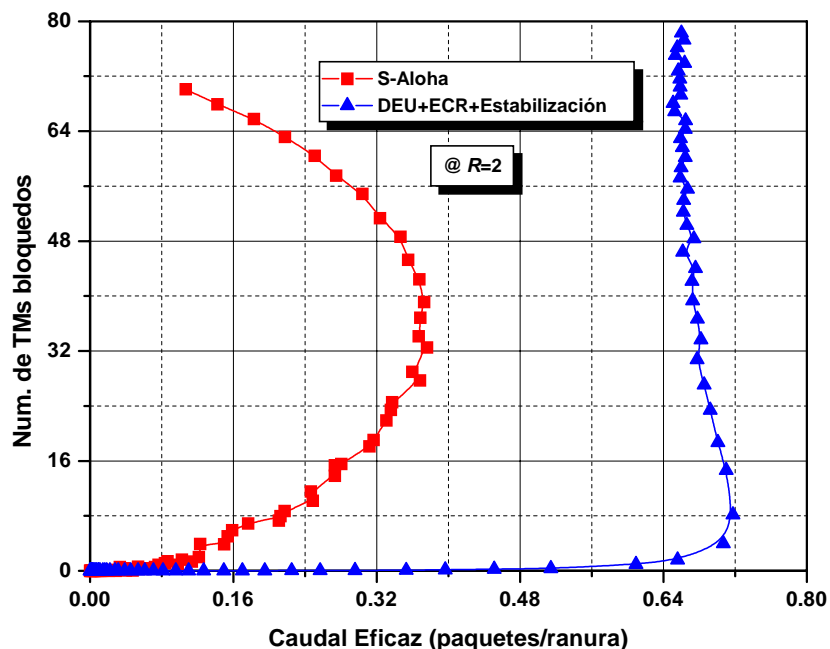


Figura 15. Comportamiento de TMs bloqueados estabilizado y alta eficiencia.

La Figura 15 muestra que en el máximo caudal eficaz para S-Aloha con canal ideal, el número de TMs bloqueados es alto, es decir, cercano al 50% del total de TMs. En nuestro caso, aplicando el algoritmo dinámico de retransmisión provoca que el número de TMs bloqueados se mantenga en un valor bajo, menos del 7% del total de los TMs. Se puede decir que aplicando un control dinámico en las probabilidades de retransmisión a través del uso del canal de retorno, esto hace más eficiente el uso del canal de información, resolviendo más rápidamente las colisiones. Como resultado de lo anterior, se obtiene un decremento en el número de TMs bloqueados en la región de bajo tráfico.

Hasta este punto se ha mencionado el caudal eficaz y el número de TMs bloqueados, otro parámetro importante del canal RACH es el retardo promedio, el cual se discute en la siguiente sección.

### V.5.2.3 Comportamiento del retardo promedio con estabilidad

De acuerdo a las estadísticas obtenidas en la [Sección V.5.2.2](#), con respecto al número de TMs bloqueados y aplicando el teorema de Little, [Rom, 1990], [Bertsekas, 1992], se puede obtener la respuesta del retardo promedio del canal RACH ([Figura 16](#)), donde el retardo promedio es definido como el número promedio de ranuras de tiempo desde que fue generado el paquete hasta que se transmitió con éxito.

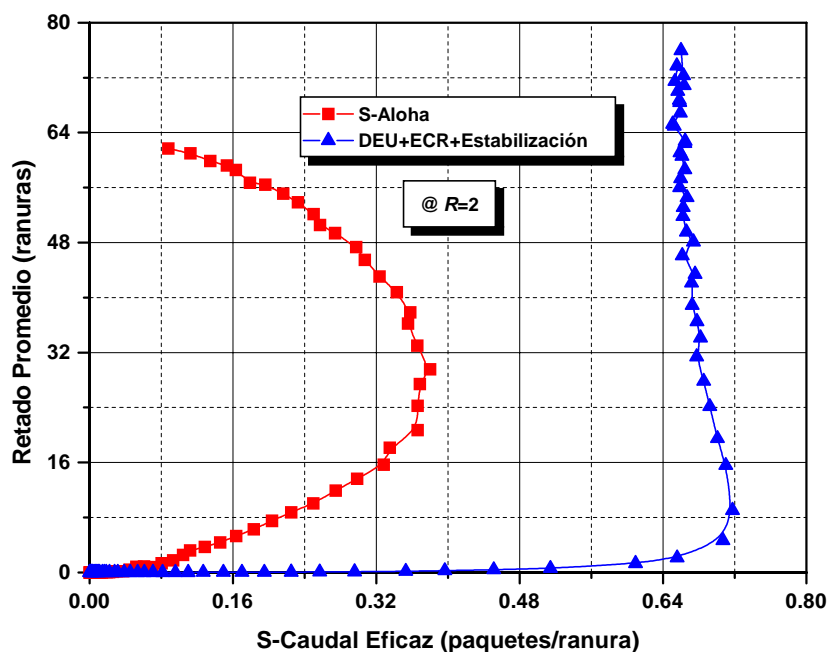


Figura 16. Comportamiento del retardo promedio estabilizado y alta eficiencia.

De acuerdo a la [Figura 16](#), se observa que cuando se usa el algoritmo dinámico de retransmisión, se presenta un mínimo retardo (casi cero) y con una mínima variación hasta alcanzar casi los 5 ranuras de tiempo en la región de máximo caudal eficaz. Sin embargo, cuando se usa un algoritmo de retransmisión constante, el retardo es alto, cercano a los 30 ranuras de tiempo, en la región de máximo caudal eficaz. Este comportamiento se debe a que el algoritmo de retransmisión optimiza el manejo del canal, ya que usa un control

dinámico en las probabilidades de retransmisión, resolviendo más rápidamente las colisiones, provocando así un decremento en el retardo en la región de bajo tráfico.

Se puede concluir que en la presencia del canal el sombreado es el elemento más sensible e influye más para incrementar la probabilidad de éxito, mientras que el desvanecimiento Rayleigh es menos sensible. Con respecto a la estabilidad del sistema diremos que al utilizar el canal de retorno se mejoran las prestaciones del sistema, obteniéndose su estabilidad. De todos los elementos tratados en este capítulo, la estabilización es el elemento más sensitivo, porque se puede tener un sistema con una muy alta eficiencia pero si el sistema es inestable estamos sujetos a trabajar en una zona de bajo tráfico.

## **V.6 CONCLUSIONES**

En este capítulo se han analizado los efectos de captura y estabilización en S-Aloha y se han identificado aquellos aspectos que degradan la respuesta del sistema. Se ha demostrado que considerando el desvanecimiento Rayleigh, el sombreado y la distribución espacial se mejora el efecto captura, resultando en un aumento considerable del caudal eficaz (sobre el 70%). Los resultados de simulación han indicado que las prestaciones del sistema del canal RACH no son sensibles al desvanecimiento Rayleigh para una sensibilidad dada en el receptor. También indican que usando un algoritmo dinámico de retransmisión con información ternaria de retorno, el caudal eficaz del sistema no decrece cuando el tráfico aumenta, el retardo es reducido y el número de TMs bloqueados disminuye. Esto ocurre porque el algoritmo de retransmisión optimiza el manejo del canal y habilita el sistema para resolver más rápidamente las colisiones.





## VI ANÁLISIS DEL ESQUEMA S-ALOHA/DS-CDMA

### VI.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo al sistema S-Aloha (petición de canal o canal RACH) se le agregará el entorno DS-CDMA (secuencia directa-CDMA en su fase de transmisión. Lo anterior permite considerar un sistema de comunicaciones móviles de tercera generación del tipo ALOHA-CDMA. Con el sistema S-Aloha/DS-CDMA se pretende tomar las ventajas que tiene cada sistema y obtener uno que sea adaptable a las condiciones del tráfico en el canal (Figura 17).

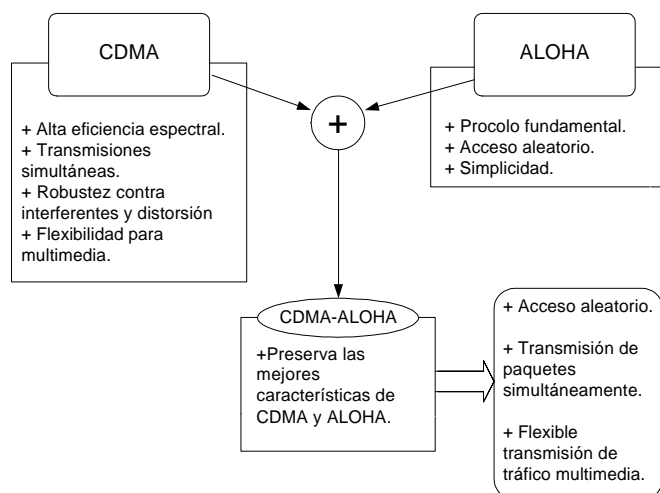


Figura 17. Características del sistema ALOHA-CDMA.

El modelo de S-Aloha investigado se modifica ahora, debido a que cuenta con el canal CDMA por lo que es necesario un nuevo análisis mediante cadenas de Markov para determinar las prestaciones del sistema [Liu, 1995], [Liu, 1994], [Lo, 1996]. Para este nuevo análisis se tomarán las propiedades y características de DS-CDMA [Ojanpera, 1998], [Yang, 1998].

El objetivo de este capítulo es efectuar un estudio completo de la técnica MAC, en el cual a S-Aloha como un subconjunto de esta técnica, se le ha sumado la fase de transmisión usando DS-CDMA. Además, este estudio debe dar como resultado una técnica MAC que sea adaptable a las condiciones del tráfico.

## **VI.2 MODELO DE S-ALOHA/DS-CDMA**

El modelado del nuevo sistema S-Aloha/DS-CDMA considera  $N$  TMs y  $K$  códigos disponibles donde  $K \geq N$ , estos TMs pueden estar en uno de los dos modos en el inicio de una ranura de tiempo: modo vacío ( $I$ ) o modo bloqueo ( $B$ ). Bajo este nuevo esquema, el modelo para el sistema S-Aloha/DS-CDMA es mostrado en la [Figura 18](#), mientras que la [Tabla V](#) define los parámetros utilizados en dicho sistema [Liu, 1995], [Liu, 1994], [Sallent y Agustí, 1998], [Sallent y Agustí, 2000].

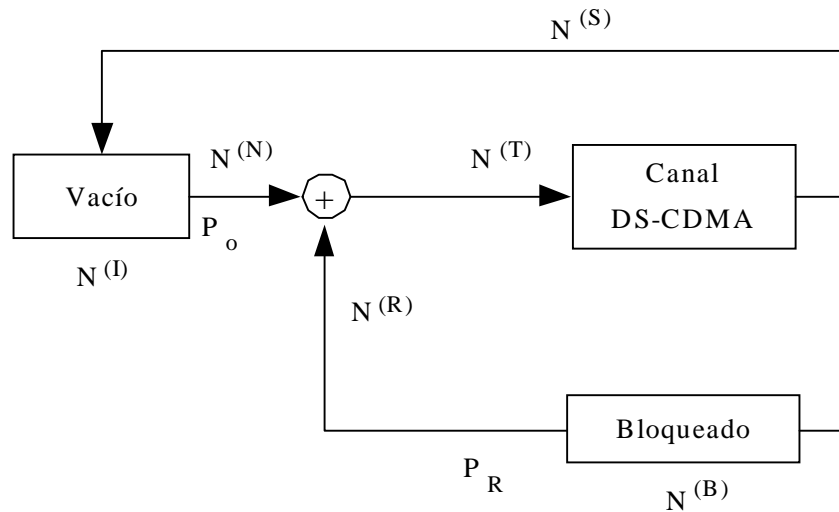


Figura 18. Modelo para el sistema S-Aloha/DS-CDMA con  $K \geq N$ .

Tabla V. Parámetros para el sistema S-Aloha/DS-CDMA con  $K \geq N$ .

$N$	Número de TMs en el sistema.
$N_k^{(B)}$	Número de TMs en modo bloqueo ( $B$ ) en el inicio de la ranura de tiempo $k$ .
$N_k^{(I)}$	Número de TMs en modo vacío ( $I$ ) en el inicio de la ranura de tiempo $k$ .
$N_k^{(T)}$	Número total de TMs transmitiendo paquetes en la ranura de tiempo $k$ .
$N_k^{(R)}$	Número de TMs en modo bloqueo transmitiendo paquetes en la ranura de tiempo $k$ .
$N_k^{(N)}$	Número de TMs en modo vacío transmitiendo paquetes en la ranura de tiempo $k$ .
$N_k^{(S)}$	Número de paquetes recibidos correctamente en la ranura de tiempo $k$ .
$p_o$	Probabilidad que un TM en modo $I$ genere un paquete en una ranura de tiempo.
$p_R$	Probabilidad que un TM en modo $B$ retransmita un paquete en una ranura de tiempo.
$P_c(n)$	Probabilidad de recibir correctamente un paquete cuando se presentan $n$ transmisiones simultáneas.

En este sistema la distribución en equilibrio es caracterizada mediante la matriz de transición de estados [Taylor, 1998], cuyos elementos  $p_{ij}$  son dados a partir de

$$p_{ij} = \Pr\left(N_{k+1}^{(B)} = j \mid N_k^{(B)} = i\right), \quad 0 \leq i, j \leq N. \quad (31)$$

donde  $p_{ij}$  es la probabilidad de transición del estado  $i$  al estado  $j$  (esto es, la probabilidad de tener  $j$  TMs en modo bloqueo cuando al inicio de la ranura de tiempo se tenían  $i$ ).

La distribución de probabilidades de cada estado en equilibrio puede representarse por el vector

$$\boldsymbol{\pi} = [\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_N], \quad \pi_i = \Pr\left(N_k^{(B)} = i\right). \quad (32)$$

La distribución en equilibrio se obtiene resolviendo el conjunto de ecuaciones lineales

$$\boldsymbol{\pi} = \boldsymbol{\pi} \mathbf{P} \text{ junto con la condición } \sum_{i=0}^N \pi_i = 1, \quad (33)$$

siendo  $\mathbf{P}$  la matriz de las probabilidades de transición

$$\mathbf{P} = [p_{ij}]_{(N+1) \times (N+1)}. \quad (34)$$

y después de un análisis exhaustivo se obtiene (un análisis más completo se muestra en el [Apéndice A](#)):

$$p_{ij} = \sum_{n=0}^N \sum_{s=0}^n \binom{N-i}{j-i+s} p_o^{j-i+s} (1-p_o)^{N-j-s} \binom{i}{n-s+i-j} p_R^{n-s+i-j} (1-p_R)^{j+s-n} \Pr\left(N^{(S)} = s \mid N^{(T)} = n\right). \quad (35)$$

La expresión para la distribución en equilibrio del paquete que llega en una ranura de tiempo, en términos de la distribución en equilibrio de la cadena de Markov es

$$\Pr\left(N_k^{(T)} = n\right) = \sum_{i=0}^N \Pr\left(N_k^{(T)} = n \mid N_k^{(B)} = i\right) \cdot \pi_i,$$

$$\Pr\left(N_k^{(T)} = n\right) = \sum_{i=0}^N \left[ \sum_{m=\max(0, n-i)}^{\min(n, N-i)} \binom{i}{n-m} p_R^{n-m} (1-p_R)^{i-n+m} \binom{N-i}{m} p_o^m (1-p_o)^{N-i-m} \right] \cdot \pi_i \quad (36)$$

Entonces, el caudal eficaz lo podemos expresar como:

$$S = \sum_{n=0}^N \left[ \sum_{s=0}^n s \Pr(N_k^{(S)} = s | N_k^{(T)} = n) \right] \Pr(N_k^{(T)} = n) \text{ paquetes/slot}, \quad (37)$$

donde:

$$\Pr(N_k^{(S)} = s | N_k^{(T)} = n) = \binom{n}{s} [P_c(n)]^s [1 - P_c(n)]^{n-s}, \quad (38)$$

siendo  $P_c(n)$  la probabilidad de recibir correctamente un paquete cuando  $n$  TMs han intentado transmitir en una ranura de tiempo

$$P_c(n) = [1 - P_b(n)]^L, \quad (39)$$

donde  $L$  es el número de bits en el paquete y  $P_b$  es la probabilidad de error en el bit

$$P_b(n) = Q(\sqrt{2 \cdot SNR}) \quad \text{con} \quad SNR = \frac{1}{\frac{2(n-1)}{3G_p}}. \quad (40)$$

Bajo este esquema, se lleva a cabo la simulación por medio de un programa en Lenguaje C, donde se simula el caudal eficaz de S-Aloha/DS-CDMA para un entorno celular en exteriores. Los paquetes de datos para cada TM son generados de acuerdo a un proceso de Bernoulli, con probabilidades de generación de  $10^{-3}$  a 1. Para cada probabilidad de generación de 10,000 ranuras de tiempo han sido transmitidas con objeto de obtener los valores promedios, donde la probabilidad de transmitir un paquete nuevo es 1. Además, de acuerdo al estándar IS-95 se considera una longitud de paquete de 200 bits, ganancia de procesamiento de 128 y ancho de banda 1.25 MHz.

Con este proceso de simulación, se obtiene el resultado que se muestra en la [Figura 19](#). En esta figura se observa que en la región de bajo tráfico el caudal eficaz es bajo, no porque existan demasiados interferentes (TMs) y produzcan errores en la transmisión de los paquetes, sino porque no hay más información que cursar. En este caso, el rendimiento del

sistema está limitado por la técnica de acceso y no por el grado de interferencia en el sistema.

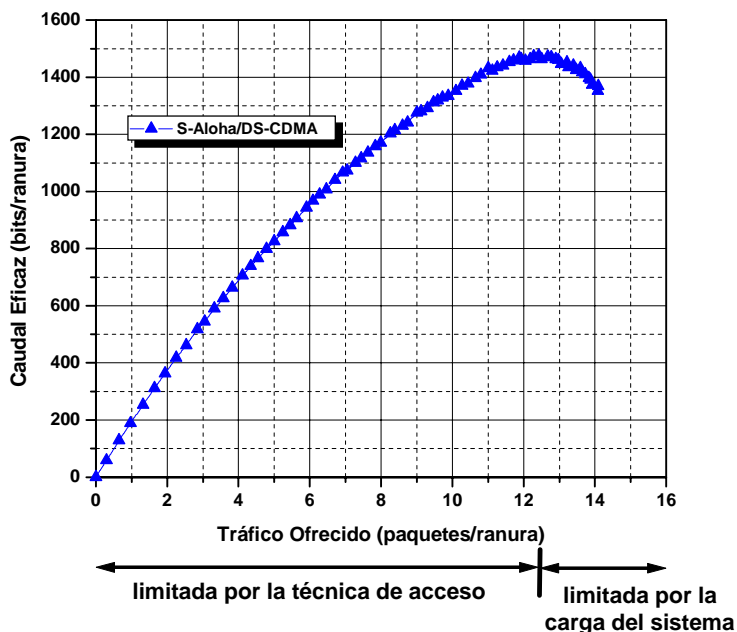


Figura 19. Comportamiento del caudal eficaz para un esquema S-Aloha/DS-DS-CDMA.

Tomando en cuenta que la respuesta del caudal eficaz es menor en la región de bajo tráfico, esto indica que hay pocos TMs transmitiendo, por lo que es necesario aumentar la velocidad de transmisión, pero manteniendo el ancho de banda constante. Al aumentar la velocidad de transmisión hay mayor flujo de bits de datos, cuyo resultado será un potencial aumento en el caudal eficaz. Por lo tanto, es necesario analizar esquemas que nos permitan modificar esta situación y así tener un sistema adaptable a las condiciones del tráfico como se ilustra en la [Figura 20](#). Es necesario analizar, por lo tanto, esquemas que nos permitan transmitir con diferentes velocidades, tales como multi-modulación, multi-códigos y multi-ganancia de procesamiento y determinar cuál esquema es el óptimo para adaptarlo al sistema S-Aloha/DS-CDMA.

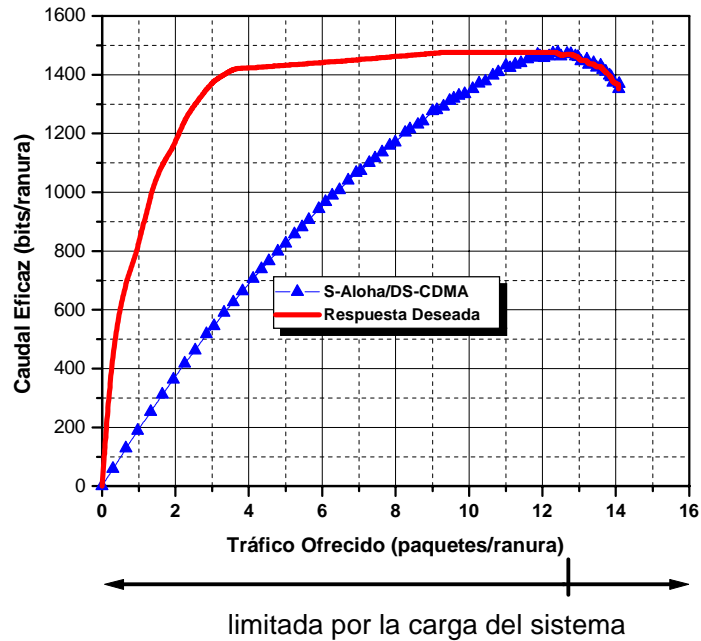


Figura 20. Comportamiento deseado del sistema S-Aloha/DS-CDMA.

## VI.3 ESQUEMAS DE MULTI-VELOCIDADES EN SISTEMAS DS-CDMA

En esta sección son analizados los tres esquemas para múltiple velocidades de datos (multi-modulación, multi-ganancia de procesamiento y multi-códigos) en un sistema DS-CDMA, determinando cuál esquema es el óptimo para adaptarlo al sistema S-Aloha/DS-CDMA y usarlo durante el desarrollo de esta tesis.

### VI.3.1 MULTI-MODULACIÓN

El análisis de un sistema BPSK (modulación por desplazamiento de fase binario) usando una sola velocidad ( $\alpha=1$ ) con  $n$  TMs simultáneos y ganancia de procesamiento  $G_p$ , puede ser aproximado asumiendo que la interferencia con otros TMs es de tipo Gaussiana con media cero. Esta aproximación para modulación en amplitud es más exacta cuando el número de

niveles incrementa. Con esta aproximación la probabilidad de error en el bit, de acuerdo a la hipótesis Gaussiana, puede ser expresada como [Pursley, 1977], [Ottosson, 1995]

$$P_b = Q \left( \left( \frac{n_o}{2E_b} + \frac{n-1}{3G_p} \right)^{-1/2} \right), \quad (41)$$

donde  $Q(x) = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \right)$ ,  $n_o$  es la densidad de ruido espectral y  $E_b$  es la energía de bit.

Para un sistema QPSK la expresión es dada como

$$P_b = Q \left( \left( \frac{n_o}{2E_b} + \frac{2(n-1)}{3G_p} \right)^{-1/2} \right). \quad (42)$$

Esta expresión puede ser modificada para esquemas M-QAM (M-Modulación por Amplitud en Cuadratura) donde M es el número de puntos que contiene la constelación de símbolos, y la probabilidad de error por símbolo para cada fase en cuadratura ( $I$  y  $Qu$ ) puede ser expresado como

$$P_e^{I/Qu} = 2 \frac{(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}} Q \left( \left( \frac{M-1}{3} \left( \frac{n_o}{E} + \frac{2(n-1)}{3G_p} \right) \right)^{-1/2} \right), \quad (43)$$

donde  $E$  es la relación señal a ruido promedio por símbolo. Debido a que las fases en cuadratura  $I$  y  $Qu$  son independientes, la probabilidad de error en el bit para relaciones señal a ruido altas puede ser aproximada a

$$P_b = \frac{2P_e^{I/Qu} - \left(P_e^{I/Qu}\right)^2}{\log_2(M)}. \quad (44)$$



Ahora suponemos un sistema con multi-modulación con  $\alpha$  velocidades  $\alpha v > \dots > 2v > v$ , donde todos los TMs tienen la misma relación señal a ruido y ganancia de procesamiento  $G_p = \frac{\Delta B}{v}$ . En este caso  $\Delta B$  es el ancho de banda del sistema y  $v$  es la velocidad básica de transmisión para los TMs en un sistema BPSK. Las probabilidades de error en el bit de un TM con M-QAM en un subsistema  $j$  están dadas como

$$P_{e,jl}^{1/Qu} = 2 \frac{(\sqrt{M} - 1)}{\sqrt{M}} Q \left( \left( \frac{M_j - 1}{3} \left( \frac{n_o}{\log_2(M_j) E_b} + \frac{2}{3G_p} \left( \sum_{i=1}^{\alpha} \frac{v_i}{v_j} n_i - 1 \right) \right) \right) \right)^{-1/2}, \quad (45)$$

donde  $v_i$  es la velocidad de bit del subsistema  $i$  y  $n_i$  es el número de TMs en el  $i$ -ésimo subsistema. El nivel de modulación, esto es, el número de datos en el espacio de la señal, es controlado por la velocidad de bit y dado por  $M_j = 2^{(v_j/v)}$ . Sin embargo, si el subsistema  $j$  es un sistema BPSK la probabilidad de error en el bit es

$$P_{b,jl} = Q \left( \left( \frac{n_o}{2E_b} + \frac{1}{3G_p} \left( \sum_{i=1}^{\alpha} \frac{v_i}{v_j} n_i - 1 \right) \right) \right)^{-1/2}. \quad (46)$$

Para entender estas fórmulas se supone que todos los TMs tienen la misma relación  $E_b/n_o$ , y que la relación energía por símbolo promedio entre el subsistema  $i$  y el subsistema  $j$  está dada por

$$\frac{E_i}{E_j} = \frac{(v_i/v_1)E_b}{(v_j/v_1)E_b} = \frac{v_i}{v_j}. \quad (47)$$

Debido a que todos los TMs tienen la misma relación señal a ruido por bit, las potencias transmitidas serán diferentes para distintos TMs. Por lo que, los TMs con muy altas velocidades transmiten con mucho más potencia que los TMs con baja velocidad. Lo que debe hacerse es incrementar la relación señal a ruido para algunos TMs y así disminuir la probabilidad de error en el bit. Sin embargo, el precio a pagar es incrementar la

probabilidad de error para los otros TMs debido a un incremento en el nivel de interferencia.

Otro esquema que nos permite manejar múltiples velocidades es multi-ganancia de procesamiento, el cual es analizado en el siguiente apartado.

### VI.3.2 MULTI-GANANCIA DE PROCESADO

Se supone ahora un sistema con multi-ganancia de procesamiento donde todos los TMs usan modulación BPSK y un periodo constante de chip  $T_c$  [I, 1995], [Oh, 1999], [Wu, 1996], [Lyu *et al.*, 1997], [Ottosson, 1998]. También, se asume que los subsistemas de velocidad de bit son ordenados en forma ascendente. Las velocidades de bit son ordenadas como  $\alpha v > \dots > 2v > v$  con las correspondientes ganancias de procesamiento  $G_{p_i} = \frac{\Delta B}{v_i}$ , donde  $v_1 = v, v_2 = 2v, \dots, v_\alpha = \alpha v$ . En resumen, se supone que todas las velocidades de bit son múltiplos de la velocidad más baja  $v$  y que las potencias con que transmiten los TMs  $P_i$  en todos los subsistemas tienen la misma relación señal a ruido por bit  $E_{b_i}$ , esto es,  $E_{b_1} = P_1 T_1 = E_{b_2} = P_2 T_2 = \dots = E_{b_\alpha} = P_\alpha T_\alpha$ . La probabilidad de error en el bit para un TM  $l$  con velocidad  $v_l$  en un sistema BPSK puede ser expresada como:

$$P_{b,l} = Q \left( \left( \frac{n_o}{2E_b} + \frac{1}{3G_{p_j}} \left( \sum_{i=1}^{\alpha} \frac{v_i}{v_j} n_i - 1 \right) \right)^{-1/2} \right). \quad (48)$$

Es fácil ver este resultado si reconocemos que  $\frac{v_i}{v_j} = \frac{P_i}{P_j}$  y por lo tanto la interferencia de los otros subsistemas se pondera de acuerdo a sus potencias transmitidas. Las propiedades de correlación entre los diferentes códigos ensanchados de los TMs permanecen iguales, independientemente del periodo  $G_{p_i}$ , porque se suponen códigos aleatorios y velocidades de chip iguales. Obsérvese que las probabilidades de error en el bit

son las mismas como para las velocidades en BPSK en un esquema multi-modulación (Ecuación (46)) si  $G_{p_i} = G_p$ .

Por último, se analiza el esquema multi-códigos en el cual cuando un TM necesita transmitir  $\alpha$  veces la velocidad base (y es permitido por la EB) convierte su flujo de bits de serie a paralelo, y con esto podrá transmitir sus paquetes con un múltiplo entero de la velocidad básica hasta un máximo de  $\alpha$  veces la velocidad básica [I, *et al.*, 1995], [Ramakrishna, 1998], [Lee *et al.*, 2001].

### VI.3.3 MULTI-CÓDIGOS (MULTI-CANAL O CANALES PARALELOS)

Suponiendo que la modulación es QPSK para todos los TMs con ganancia de procesado  $G_p$ , periodo de chip  $T_c$  y que todos los TMs transmiten con la misma relación señal a ruido por bit. Si  $v$  es la velocidad básica para un canal QPSK, todas las velocidades que son múltiplos de esta velocidad pueden ser llevadas a cabo. Por ejemplo, TMs con velocidad  $v_i$  usan  $v_i/v$  códigos (canales) en paralelo para transmitir sus datos. Observe también que todos los TMs usan el mismo ancho de banda  $\Delta B = \frac{G_p v}{2}$ , donde  $v/2$  es la velocidad de datos. La probabilidad de error en el bit es dada por [Ottosson, 1998] como

$$P_{b,ji} = Q \left( \left( \frac{n_o}{2E_b} + \frac{2}{3G_p} \left( \sum_{i=1}^{\alpha} \frac{v_i}{v} n_i - 1 \right) \right)^{-1/2} \right). \quad (49)$$

Note que las probabilidades de error en el bit son casi las mismas con respecto al esquema de multi-ganancia de procesado. El resultado de un sistema multi-códigos debe ser ligeramente mejor que éste, porque los canales paralelos de un TM pueden ser transmitidos síncronamente y, por lo tanto, es posible usar códigos con buenas propiedades de correlación cruzada. Si por ejemplo, los códigos son ortogonales con tiempos de

desfasamiento cero (síncrono) y tienen propiedades aleatorias para todos los otros desfasamientos, la probabilidad de error en el bit debe disminuir a:

$$P_{b,ji} = Q \left( \left( \frac{n_o}{2E_b} + \frac{2}{3G_p} \left( \sum_{i=1}^{\alpha} \frac{v_i}{v} n_i - \frac{v_j}{v} \right) \right)^{-1/2} \right). \quad (50)$$

Se pueden construir códigos reales con estas propiedades, por ejemplo los códigos Walsh-Hadamard y los códigos ortogonales de Gold cumplen estos requerimientos [Dinan, 1998].

### VI. 3.4 EVALUACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE MULTI-VELOCIDADES

En la evaluación de un esquema multi-modulación, primero se calculan las probabilidades de error en el bit para diferentes tipos de modulaciones, en un sistema con una sola velocidad. Comparamos los diferentes esquemas de modulación asumiendo que la velocidad total de todos los TMs (TMs con una sola velocidad) es constante. Esto es motivado, debido al hecho que con una alta velocidad, el TM puede usar un canal de alta velocidad (esquema de modulación), o varios canales con una velocidad más baja al mismo tiempo. En otras palabras, un TM con baja velocidad puede usar división de tiempo para compartir un canal de alta velocidad con uno o más TMs. También se suponen secuencias ensanchadas aleatorias, ganancia de procesamiento  $G_p=128$  y canal AWGN (ruido aditivo blanco gaussiano). Los resultados de este sistema son mostrados en la [Figura 21](#).

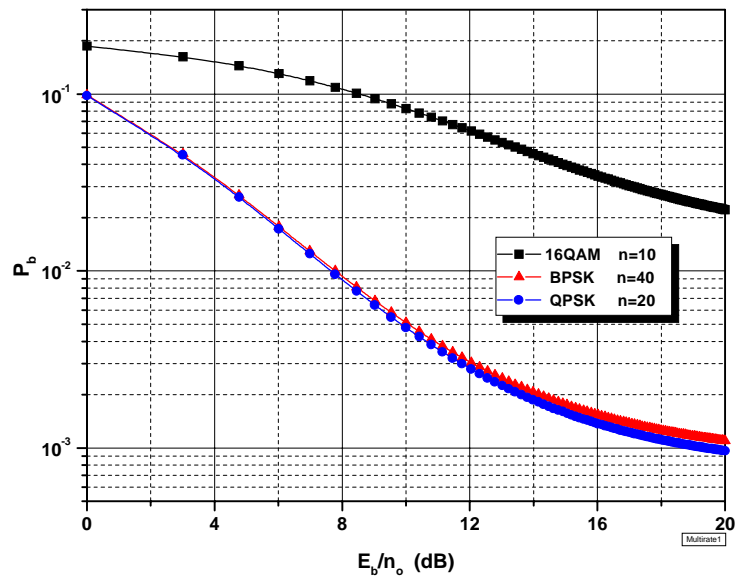


Figura 21. Comparación de diferentes esquemas de modulación de una sola velocidad en un canal AWGN.

De la [Figura 21](#), observamos que BPSK y QPSK tienen casi la misma probabilidad de error en el bit y estos esquemas tienen una mejor respuesta que 16QAM. Además, se observa que QPSK es ligeramente mejor que BPSK debido a que el número de TMs con modulación QPSK es solamente la mitad del número de TMs con modulación BPSK. Por lo tanto, cada uno de los  $n$  TMs de tipo BPSK son perturbados por  $n-1$  TMs. En el caso de QPSK, las fases de cuadratura de los TMs interferentes pueden ser vistas como TMs con modulación BPSK con la misma potencia como en el sistema BPSK. Así, cada una de las fases de los  $n/2$  TMs con modulación QPSK son perturbados mediante  $(n/2-1) \cdot 2 = n-2$  TMs equivalentes al sistema BPSK, resultando en niveles de potencia interferentes ligeramente más bajos para el sistema QPSK. Estos resultados indican que el esquema de multi-modulación sugerido es un esquema de multi-velocidad ineficiente.

Para comparar los diferentes esquemas de multi-velocidades se han construido los sistemas de prueba de acuerdo a la [Tabla VI](#).

Tabla VI. Sistemas de prueba para evaluación de multi-velocidad.

Ancho de Banda	Velocidades de bit
$\Delta B$	$v_1=v, v_2=2v, v_4=4v$

Para el esquema de multi-ganancia de procesado, la ganancia de procesado es  $G_{p_i} = \frac{\Delta B}{v_i}$ , donde el ancho de banda del sistema es  $\Delta B = vG_{p_{max}}$  y  $G_{p_{max}} = 256$ . Trasladando esto a un esquema de multi-modulación, la ganancia de procesado es  $G_p = G_{p_{max}}$ . En el esquema de multi-códigos, la ganancia de procesado es  $G_p = G_{p_{max}}$ , porque  $v$  es la velocidad de bit para un canal QPSK y por lo tanto la velocidad de datos es  $v/2$ . En la [Tabla VII](#) se resumen las características de los esquemas de multi-velocidades tratados.

Tabla VII. Características de los diferentes esquemas de multi-velocidades .

Parámetro	Multi-modulación	Multi-ganancia de procesado	Multi-códigos
Ancho de banda	$\Delta B = vG_{p_{max}}$	$\Delta B = vG_{p_{max}}$	$\Delta B = (v/2)G_p$
Modulación	BPSK/M-QAM $M_j = 2^{(R_j/R_i)}$	BPSK	QPSK
Velocidad de datos	$v$	$v_i$	$v/2$
Ganancia de procesado	$G_p = G_{p_{max}}$	$G_{p_i} = \frac{\Delta B}{v_i}$	$G_p$

Utilizando las características resumidas en la [Tabla VII](#), los resultados obtenidos para los esquemas de multi-velocidades con  $n_4=5$ ,  $n_2=10$  y  $n_1=40$  se muestran en la [Figura 22](#).

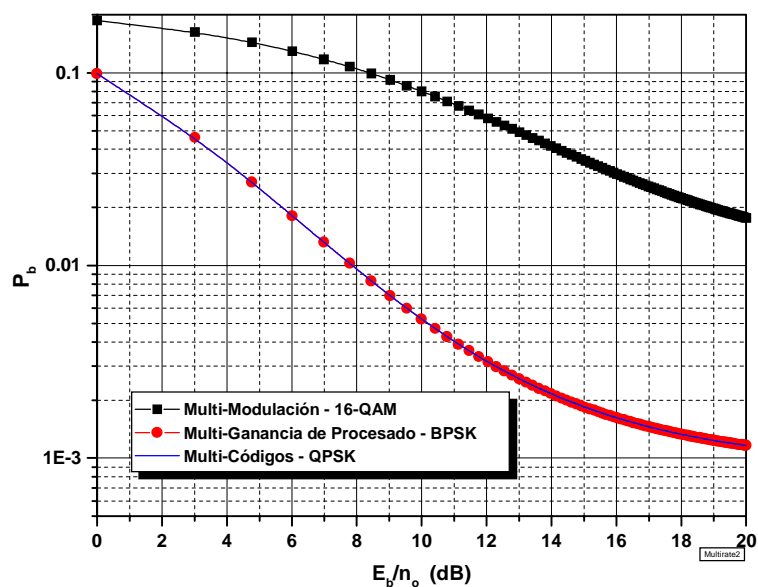


Figura 22. Prestaciones de los diferentes esquemas de multi-velocidades en un canal AWGN.

En la [Figura 22](#), se observa que el esquema de multi-ganancia de procesado y el esquema de multi-códigos tienen casi las mismas probabilidades de error en el bit. El esquema de multi-códigos tiene la más alta ganancia de procesado  $G_p = 512$  y por lo tanto mayor protección ante interferentes. El esquema de multi-modulación tiene las peores probabilidades de error en el bit para los más altos niveles de modulación (16-QAM en este caso). Observe, que los TMs usando BPSK y QPSK tienen las mismas probabilidades de error en el bit, tanto cuando se usó una misma velocidad, como con múltiples velocidades. Además, el esquema de multi-modulación soporta bajas velocidades. Sería posible aumentar la energía para las más altas velocidades con el fin de disminuir la probabilidad de error de bit para un cierto nivel. Sin embargo, esto aumentaría la relación de error de bit para los otros TMs.

De acuerdo a lo anterior, se puede concluir que los tres esquemas tratados provocan un aumento en el nivel de interferencia. Hay que mencionar que con el esquema de multi-modulación la interferencia aumenta debido a que en el receptor se presenta la interferencia tanto en la componente de fase, como en cuadratura. En cambio, en multi-ganancia de

procesado el nivel de interferencia se incrementa porque se reduce la ganancia de procesado. Cuando usamos multi-códigos, aumenta el nivel de interferencia debido a que aumenta la potencia transmitida.

Por lo anterior, dada la mala relación señal a interferente el esquema de multi-modulación es descartado. Falta por determinar cuál de los dos esquemas restantes es óptimo para adaptarlo a DS-CDMA.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este apartado, las probabilidades de error en el bit de los esquemas de multi-ganancia de procesado y multi-códigos son casi las mismas. No obstante; conviene resaltar que:

- Una desventaja del esquema multi-código es que TMs transmitiendo a una alta velocidad necesitan de amplificadores lineales.
- En multi-ganancia de procesado cuando se transmite un paquete puede que se reciba todo el paquete o que se deseché todo el paquete. En cambio, en multi-códigos la información se divide en  $\alpha$  paquetes distintos, por lo que se pensaría que al usar multi-códigos se tendría un caudal eficaz mayor que con multi-ganancia de procesado pero no es así, porque en multi-códigos cuando uno de los paquetes es decorrelado por un receptor y se presenta un error, a todos los demás paquetes les sucederá lo mismo.
- La velocidad de transmisión en multi-códigos se ve limitada a transmitir en múltiplos de la velocidad básica, en cambio con multi-ganancia de procesado esto no sucede porque hay mayor flexibilidad en el manejo de  $\alpha$ .

Como se busca diseñar un sistema MAC que sea adaptable a las condiciones del tráfico, y dadas las características de transmisión, se opta por trabajar con multi-ganancia de procesado. Por lo tanto, con el esquema de multi-ganancia de procesado, se tendrá un sistema con diversas velocidades de transmisión y distintos grados de protección a interferencias, dando pie a desarrollar algoritmos que sean capaces de seleccionar la velocidad de transmisión más adecuada a las condiciones de carga del canal.



A continuación se presentan el análisis de S-Aloha/DS-CDMA adaptable a las condiciones del tráfico en el canal radio, considerando un esquema de multi-ganancia de procesado.

## VI.4 MODELO DE S-ALOHA/DS-CDMA ADAPTABLE A LAS CONDICIONES DEL TRÁFICO EN EL CANAL

Como primer paso para lograr que S-Aloha/DS-CDMA sea adaptable a las condiciones del tráfico en el canal, es necesario obtener la mejor combinación de velocidades cuando estén presentes  $n$  TMs al mismo tiempo [Kim D. *et al.*, 2001]. Esto se puede representar mediante el problema de optimización con restricciones:

$$\begin{aligned} \max_{(n_v, n_{2v}, n_{4v})} \quad & S(n_v, n_{2v}, n_{4v}) \\ \text{sujeto a} \quad & n_v + n_{2v} + n_{4v} = n, \end{aligned} \quad (51)$$

donde  $n_v$  indica el número de TMs transmitiendo a una velocidad de  $v$  b/s,  $n_{2v}$  el número TMs usando  $2v$  b/s,  $n_{4v}$  el número de TMs con velocidad de  $4v$  b/s<sup>7</sup>,  $n$  el número total de TMs simultáneos,  $S$  es el caudal eficaz usando la combinación de las velocidades de transmisión y  $L$  es la longitud del paquete. Entonces:

$$S(n_v, n_{2v}, n_{4v}) = n_v [P_{c,(v)}(n_v, n_{2v}, n_{4v})] L + n_{2v} [P_{c,(2v)}(n_v, n_{2v}, n_{4v})] 2L + n_{4v} [P_{c,(4v)}(n_v, n_{2v}, n_{4v})] 4L. \quad (52)$$

Tomando en cuenta el análisis de cadenas de Markov hecho en la [Sección VI.2](#), podemos evaluar las prestaciones óptimas del sistema, pero se deben hacer algunas modificaciones. La expresión usada para evaluar la BER (tasa de error) debe ser modificada, con objeto de tomar en cuenta que el canal radio será compartido por TMs con

---

<sup>7</sup> Aunque no hay restricciones en el número de  $\alpha$ , por claridad y simplicidad solamente se consideran tres velocidades ( $\alpha=1, 2, 4$ ), sin perder aplicabilidad.

diferentes velocidades. La probabilidad de éxito del paquete bajo un control de potencia perfecta puede además ser calculada como

$$(SNR)_{\alpha v} = \frac{1}{\frac{2}{3G_p} \left[ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq \alpha}}^K i \times n_{iv} + \alpha \times (n_{\alpha v} - 1) \right]}, \quad (53)$$

por lo que la probabilidad de error en el bit es<sup>8</sup>

$$P_{b,(\alpha v)}(n_v, n_{2v}, \dots, n_{4v}) = Q\left(\sqrt{2(SNR)_{\alpha v}}\right), \quad (54)$$

y la probabilidad de recibir correctamente un paquete es

$$P_{c,(\alpha v)}(n_v, n_{2v}, \dots, n_{Kv}) = [1 - P_{b,(\alpha v)}(n_v, n_{2v}, \dots, n_{Kv})]^{\alpha L}. \quad (55)$$

Por lo tanto la probabilidad de obtener  $s$  paquetes con éxito cuando se transmiten  $n$  paquetes es ahora dada por

$$\begin{aligned} P(N_k^{(S)} = s | N_k^{(T)} = n) = & \sum_{i=\max(0, s-n_{2v}, -n_{4v})}^{\min(n_v, s)} \sum_{j=\max(0, s-i-n_{4v})}^{\min(n_{2v}, s-i)} \binom{n_v}{i} [P_{c,(v)}]^i [1 - P_{c,(v)}]^{n_v-i} \\ & \times \binom{n_{2v}}{j} [P_{c,(2v)}]^j [1 - P_{c,(2v)}]^{n_{2v}-j} \\ & \times \binom{n_{4v}}{s-i-j} [P_{c,(4v)}]^{s-i-j} [1 - P_{c,(4v)}]^{n_{4v}-s+i+j}. \end{aligned} \quad (56)$$

Así, la expresión del caudal eficaz ahora es

---

<sup>8</sup> Se considera que el sistema solo está limitado por las interferencias. El efecto del ruido térmico se puede despreciar.

$$S = \sum_{n=0}^N \left\{ \sum_{s=0}^n \sum_{i=\max(0, s-n_{2v}, -n_{4v})}^{\min(n_v, s)} \sum_{j=\max(0, s-i-n_{4v})}^{\min(n_{2v}, s-i)} [Li + 2Lj + 4L(s-i-j)] \binom{n_v}{i} [P_{c,(v)}]^i [1-P_{c,(v)}]^{n_v-i} \right. \\ \left. \times \binom{n_{2v}}{j} [P_{c,(2v)}]^j [1-P_{c,(2v)}]^{2n_v-j} \binom{n_{4v}}{s-i-j} [P_{c,(4v)}]^{s-i-j} [1-P_{c,(4v)}]^{n_{4v}-s+i+j} \right\} \\ \times \Pr(N_k^{(T)} = n). \quad (57)$$

El análisis hecho en la [Sección VI.2](#) fue tomando en cuenta que hay más códigos que TMs, pero en la realidad no sucede eso dado que es difícil encontrar grandes familias de códigos de ensachamiento (spread codes) que presenten buenas propiedades de correlación [[Dinan, 1998](#)]. Por lo tanto, es necesario un escenario real en el que se tengan más TMs que códigos y esto se presenta en el siguiente apartado.

## VI.5 MODELO DE S-ALOHA/DS-CDMA CON MAYOR NÚMERO DE TERMINALES MÓVILES QUE CÓDIGOS

El modelo para el sistema S-Aloha/DS-CDMA para  $K < N$  se muestra en la [Figura 23](#), mientras los elementos del sistema para esta sección son definidos tanto en la [Tabla V](#) como en la [Tabla VIII](#).

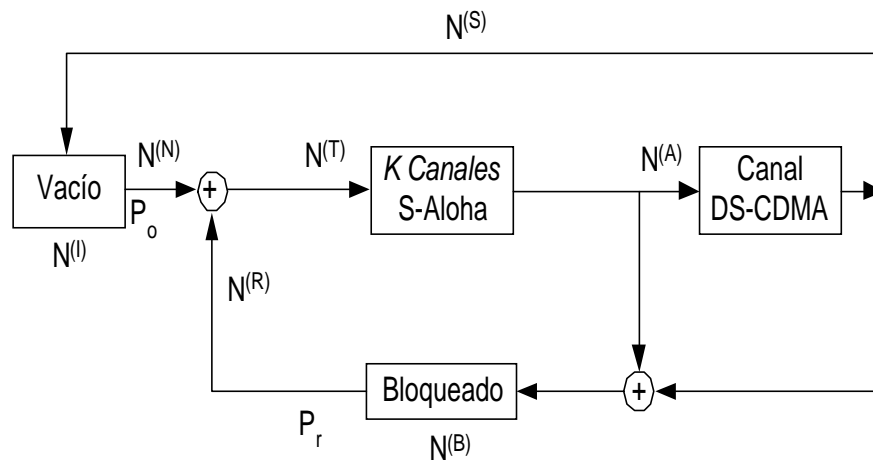


Figura 23. Modelo S-Aloha/DS-CDMA con  $K < N$ .

Tabla VIII. Lista de parámetros adicionales para el sistema S-Aloha/DS-CDMA con  $K < N$ .

$K$	Número de códigos-receptor en la estación base.
$N_k^{(A)}$	Número de TMs que son recibidos en la ranura de tiempo $k$

Para el análisis realizado se tomó el procedimiento realizado en la [Sección VI.2](#), siempre y cuando se introduzcan las correcciones necesarias a la cadena de Markov. La primera corrección es la probabilidad de transición de una etapa del estado  $i$  al estado  $j$  calculada en la [Ecuación \(35\)](#), donde el número de paquetes que se pueden transmitir correctamente no debe ser mayor al número de códigos disponibles ( $K$ ). Haciendo esta modificación se obtiene

$$p_{ij} = \sum_{n=0}^N \sum_{s=0}^{\min(n,K)} \binom{N-i}{j-i+s} p_o^{j-i+s} (1-p_o)^{N-j-s} \binom{i}{n-s+i-j} p_R^{n-s+i-j} (1-p_R)^{j+s-n} \Pr(N^{(S)} = s | N^{(T)} = n). \quad (58)$$

Otra modificación es, en la evaluación de la función de probabilidad del número de paquetes recibidos correctamente, condicionada al número de paquetes transmitidos. Esto separado en dos etapas: la transmisión y la recepción correcta de los paquetes. Con estas dos etapas se obtiene que

$$\Pr(N_k^{(S)} = s | N_k^{(T)} = n) = \sum_{a=0}^{\min(n,K)} \Pr(N_k^{(S)} = s | N_k^{(A)} = a, N_k^{(T)} = n) \Pr(N_k^{(A)} = a | N_k^{(T)} = n), \quad (59)$$

donde la probabilidad condicional del número de paquetes recibidos correctamente dado que hay  $n$  paquetes transmitidos y  $a$  paquetes recibidos es

$$\Pr(N_k^{(S)} = s | N_k^{(A)} = a, N_k^{(T)} = n) = \begin{cases} \binom{a}{s} [P_c(n)]^s [1-P_c(n)]^{a-s} & 0 \leq s \leq a, \\ 0 & \text{para otro caso.} \end{cases} \quad (60)$$

La expresión anterior es considerando que la EB no envía reconocimiento de recepción a los TMs. Por este motivo, los TMs continúan transmitiendo sin importar que

haya colisión, por lo que la probabilidad de recibir correctamente un paquete  $P_c$  depende de  $n$ . Para corregir esto, la EB determina qué TMs han sido recibidos correctamente; además, los TMs deben esperar el reconocimiento para que sigan transmitiendo. Ahora la probabilidad condicional se modifica a

$$\Pr(N_k^{(S)} = s | N_k^{(A)} = a, N_k^{(T)} = n) = \begin{cases} \binom{a}{s} [P_c(a)]^s [1 - P_c(a)]^{a-s} & 0 \leq s \leq a, \\ 0 & \text{para otro caso,} \end{cases} \quad (61)$$

donde la probabilidad condicional queda en términos de  $P_c(a)$ , ya que, a pesar de que inicialmente transmiten  $n$  TMs, al recibirse únicamente  $a$  códigos serán éstos los que proseguirán la transmisión, quedando por determinar la probabilidad de que se reciban  $a$  códigos cuando  $n$  TMs inician la transmisión. Esto es (ver [Apéndice B](#))

$$\Pr(N_k^{(A)} = a | N_k^{(T)} = n) = \begin{cases} \frac{\binom{K}{a} \binom{n}{a} a! \left[ (K-a)^{(n-a)} - \sum_{i=1}^{K-a-1} (-1)^{i-1} \binom{K-a}{i} \right]}{K^n}, & \text{si } 0 \leq a \leq \min(n, K), \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (62)$$

Con los nuevos cálculos se puede determinar el caudal eficaz en el sistema para un ambiente real

$$S = \sum_{n=0}^N \left[ \sum_{s=0}^{\min(n, K)} s \times \Pr(N_k^{(S)} = s | N_k^{(T)} = n) \right] \times \Pr(N_k^{(T)} = n) \text{ paquetes/slot} . \quad (63)$$

Al modelado realizado en los apartados anteriores, hay que añadirle nuevos algoritmos para manejar dinámicamente las velocidades de transmisión, para que el sistema S-Aloha/DS-CDMA pueda adaptarse a las condiciones del tráfico en el canal.

## **VI. 6 ALGORITMOS PARA EL CAMBIO EN LA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN**

En esta sección se presentan tres algoritmos para el cambio en la velocidad de transmisión. De los tres algoritmos uno es controlado por el TM y dos por la EB. La idea de estos algoritmos es monitorear el tráfico del canal con objeto de acomodar adecuadamente las velocidades de transmisión.

### **VI.6.1 ALGORITMO CONTROLADO POR EL TERMINAL MÓVIL**

Este algoritmo es ejecutado por el TM y trabaja de la siguiente manera: cada TM traza su propia evolución durante el tiempo de transmisión, esto es, los TMs cuentan sus paquetes con éxito o erróneos. En la ausencia de errores, el TM asumirá una carga de tráfico baja y prueba con una velocidad de transmisión más alta. Si ocurren errores, el TM decide que el canal está demasiado cargado y prueba con una velocidad de transmisión más baja. Este algoritmo lo denominaremos como Algoritmo MS (*Mobile Station*)

Específicamente, el TM necesita establecer solamente dos parámetros: el número de paquetes consecutivos con fallas antes de cambiar a una velocidad más baja ( $\text{max\_tr}$ ), y el número consecutivo de paquetes con éxito antes de probar una velocidad más alta ( $\text{min\_suc}$ ). Estos parámetros pueden ser adaptables de acuerdo al tráfico del canal.

### **VI.6.2 ALGORITMO CONTROLADO POR LA ESTACIÓN BASE**

a) *Algoritmo BS-I (Base Station-I)*: Este algoritmo es manejado por la EB, la cual decide la velocidad de transmisión a ser usada. La EB estima el número de TMs que han intentado transmitir en una ranura de tiempo dada. Entonces, la EB guarda a los  $n$  TMs más probables para ocupar la siguiente ranura de tiempo. Nótese que dada una carga ofrecida  $G$ , el número de TMs activos en cualquier ranura de tiempo sigue una distribución binomial. Debido a que la EB no conoce qué TMs van a transmitir, ésta tiene que difundir la

probabilidad que se puede usar para cada velocidad de transmisión. Una manera de simplificar el algoritmo es que la EB decida qué velocidades se pueden usar por medio de valores umbrales. Esto es, el umbral  $L_1$  indica que para  $n < L_1$  todos los TMs usarán  $4v$  b/s en la siguiente ranura de tiempo,  $L_2$  indica que para  $L_1 < n < L_2$  todos los TMs usarán  $2v$  durante la siguiente ranura de tiempo, y para  $n > L_2$  todos los TMs usarán  $v$  b/s.

b) *Algoritmo BS-II (Base Station-II)*: Una mejora en las prestaciones obtenidas con el algoritmo BS-I si la EB conoce con anticipación el número exacto de TMs listos para transmitir en una ranura de tiempo dada. Para este propósito, la ranura de tiempo es dividida en dos partes: la primera parte de la ranura de tiempo es usada para indicar que un paquete está programado para transmitir, y en la segunda parte la información es transmitida eventualmente. Con esto, la EB cuenta cuántos TMs intentarán transmitir y selecciona la combinación óptima de las velocidades a ser empleadas, de acuerdo a las ecuaciones (52) y (53).

## VI.7 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS NUMÉRICO

El proceso de simulación contempla los tres algoritmos mencionados anteriormente para obtener un sistema S-Aloha/DS-CDMA adaptable a las condiciones del tráfico. Además, se considera que hay menos códigos que TMs. Para realizar la simulación se toma el modelado matemático presentado en los apartados anteriores y llevado a cabo por medio de un programa hecho en lenguaje C.

La simulación se considera un entorno celular en exteriores, en donde se asume que cada paquete está contenido en la ranura de tiempo. Los paquetes de datos para cada TM son generados de acuerdo a un proceso de Bernoulli con probabilidades de generación de  $10^{-3}$  a 1. Para cada probabilidad de generación 10,000 ranuras de tiempo han sido transmitidas, con objeto de obtener los valores promedio, donde la probabilidad de transmitir un paquete nuevo es 1, independientemente del valor actual de retransmisión.

También se considera una memoria temporal con capacidad unitaria. Adicionalmente, en la [Tabla IX](#) se consideran los parámetros de simulación que corresponden al estándar IS-95.

**Tabla IX. Parámetros de simulación de S-Aloha/DS-CDMA.**

Parámetro	Cantidad
Ancho de banda – $\Delta B$	1.25 MHz
Población de TMs – N	80
Número de códigos – K	25
Longitud del paquete – L	200 bits
Ganancia de procesado- $G_p$	128

Se presentan cuatro casos en nuestra simulación:

1. Velocidad de transmisión constante.
2. Algoritmo controlado por el terminal móvil (algoritmo MS).
3. Algoritmo controlado por la estación base utilizando umbrales (algoritmo BS-I).
4. Algoritmo controlado por la estación base utilizando la mejor combinación de velocidades (algoritmo BS-II).

### VI.7.1 VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN CONSTANTE

Antes de simular los algoritmos de adaptación a las condiciones del tráfico, es necesario evaluar las prestaciones del caudal eficaz, para velocidades de transmisión constante, considerando solamente tres velocidades  $1v$ ,  $2v$  y  $4v$  ( $\alpha v$ , donde  $\alpha=1,2,4$ ). Para obtener los resultados, es necesario variar la ganancia de procesado dependiendo de la velocidad a la que se esté transmitiendo ( $\alpha v \rightarrow G_p/\alpha$ ). Los resultados obtenidos para el caudal eficaz con distintas velocidades se muestran en la [Figura 24](#).



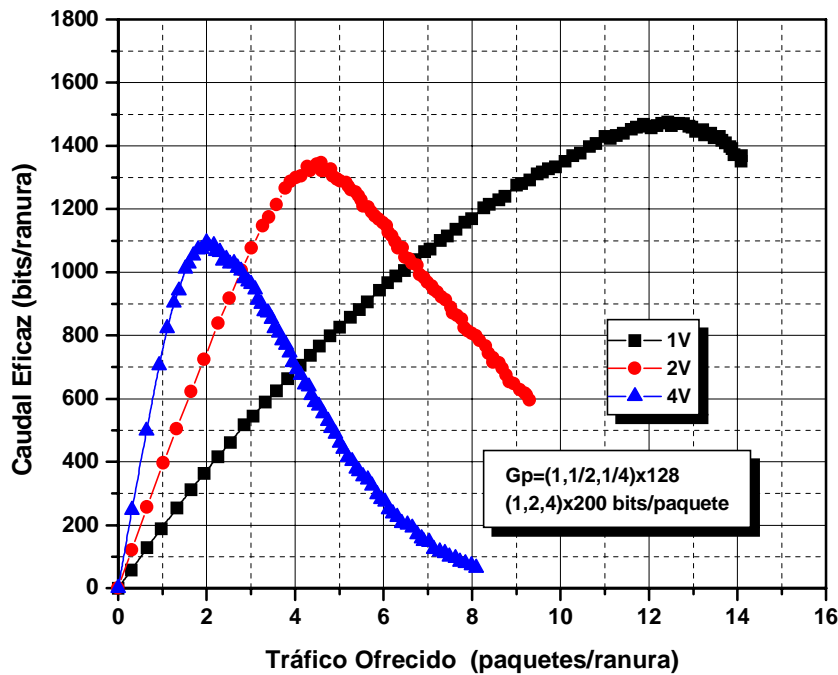


Figura 24. Comportamiento del caudal eficaz para distintas velocidades de transmisión.

De la [Figura 24](#) observamos que de acuerdo con la velocidad básica (1v), el caudal eficaz es bajo en la región de bajo tráfico, debido a que hay pocos TMs transmitiendo y no porque haya demasiada interferencia entre TMs. Si aumentamos al doble la velocidad de transmisión 2v, la ganancia de procesado se reduce a la mitad ( $G_p/2$ ), posible ya que no tiene caso que se tenga una  $G_p$  alta cuando hay pocos TMs intentando transmitir.

Además, cuando se aumenta la velocidad de transmisión el caudal eficaz disminuye, ya que éste está en función de la probabilidad de recibir correctamente un paquete  $P_c$ . Si se aumenta la velocidad de transmisión, la probabilidad de recibir correctamente un paquete disminuye y esto se ve reflejado en el caudal eficaz sucede de la misma manera cuando se sigue aumentando la velocidad. Lo importante de esto es que se puedan usar distintas velocidades dependiendo del tráfico en el canal, por lo que se necesitan algoritmos que manejen dinámicamente las velocidades de transmisión y que se adapten a las condiciones del tráfico.

Ahora, es necesario evaluar otro parámetro importante, que es el retardo. Este comportamiento lo observamos en la [Figura 25](#).

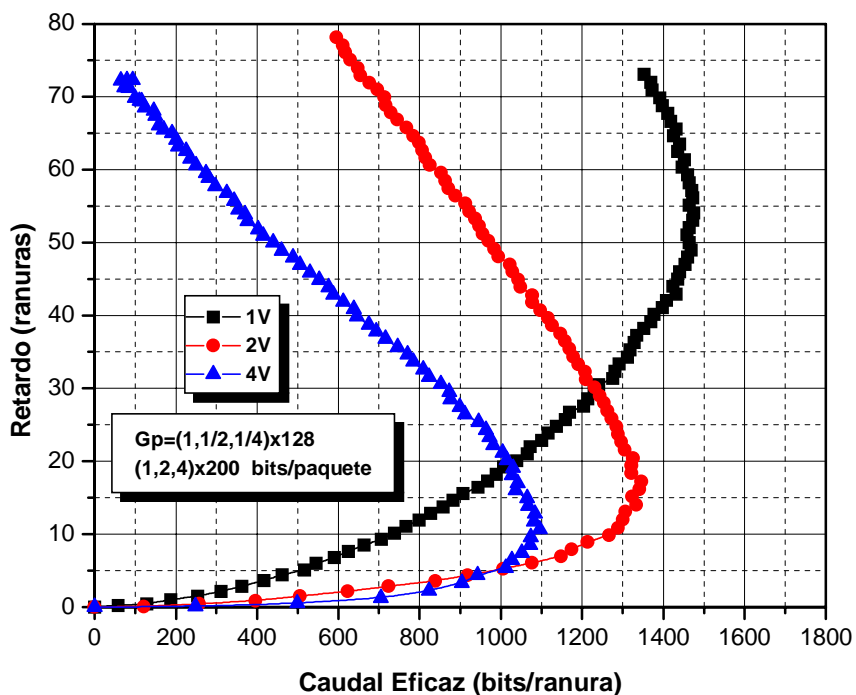


Figura 25. Comportamiento del retardo para distintas velocidades de transmisión.

En la [Figura 25](#), observamos que el retardo es alto en el máximo caudal eficaz cuando se utiliza una velocidad 1v; esto es, porque se presentan demasiadas colisiones. Al aumentar la velocidad se aumenta el número de bits en la transmisión, pero lo importante para este caso es que el retardo disminuye debido a que hay pocos TMs, por lo tanto, la probabilidad de que asignen códigos iguales disminuye. Con respecto a la interferencia multiusuario, se puede decir que no afecta demasiado ya que se ha mencionado que hay pocos TMs.

## VI.7.2 ALGORITMO CONTROLADO POR EL TERMINAL MÓVIL

Hasta este momento, solo se ha mencionado el comportamiento del caudal eficaz y el retardo para diferentes velocidades de transmisión, pero el objetivo es obtener una técnica MAC (Medium Access Control) que sea adaptable a las condiciones del tráfico en el canal radio. Usando el algoritmo MS, el TM aumenta o disminuye su velocidad de transmisión dependiendo el número de éxitos o fallos consecutivos. El comportamiento del caudal eficaz para distintos casos se muestra en la [Figura 26](#).

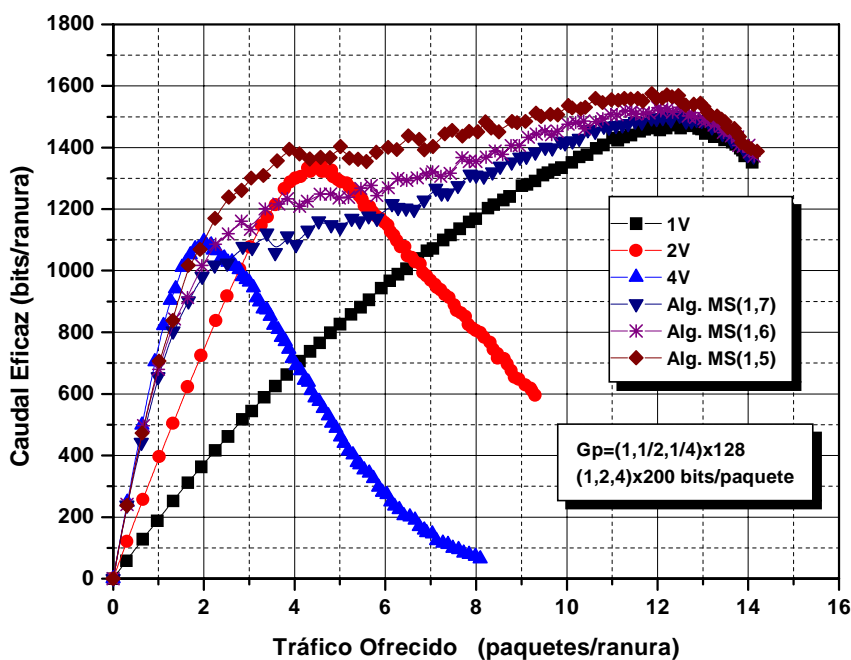


Figura 26. Comportamiento del caudal eficaz con el algoritmo MS.

En la Figura 26 se ilustran tres casos para el algoritmo MS: MS(1,7), MS(1,6) y MS(1,5). La dupla MS(max\_tx, min\_suc) nos indica cuantas fallas consecutivas debe haber antes de disminuir la velocidad de transmisión (max\_tr), mientras que min\_suc indica cuantos éxitos consecutivos debe haber antes de aumentar la velocidad de transmisión. Hay que mencionar que la velocidad máxima es 4v y la mínima 1v. En la misma figura observamos que la dupla MS(1,5) tiene el mejor comportamiento ya que se adapta mejor a

las condiciones de tráfico. Una ventaja de este algoritmo es que es manejado por el TM, por consiguiente no necesita ninguna información de la EB para aumentar o disminuir su velocidad de transmisión, pero se necesita hacer varias pruebas para encontrar la mejor alternativa para la dupla  $MS(max\_tx, min\_suc)$ . Al incrementar  $max\_tx$  (mayor que 1) lo que produce es reducir la capacidad del algoritmo. Reduciendo  $min\_suc$  (menor que 5) resulta en elevar el valor óptimo, mientras con  $min\_suc > 5$  la adaptación al tráfico sería menor. Se ha obtenido una respuesta en el caudal eficaz adecuada, pero es necesario obtener el comportamiento del retardo para determinar si el algoritmo cumple con lo propuesto: adaptabilidad de la carga al sistema y un retardo bajo. La [Figura 27](#) muestra el comportamiento obtenido del retardo para el caso de  $MS(1,5)$ .

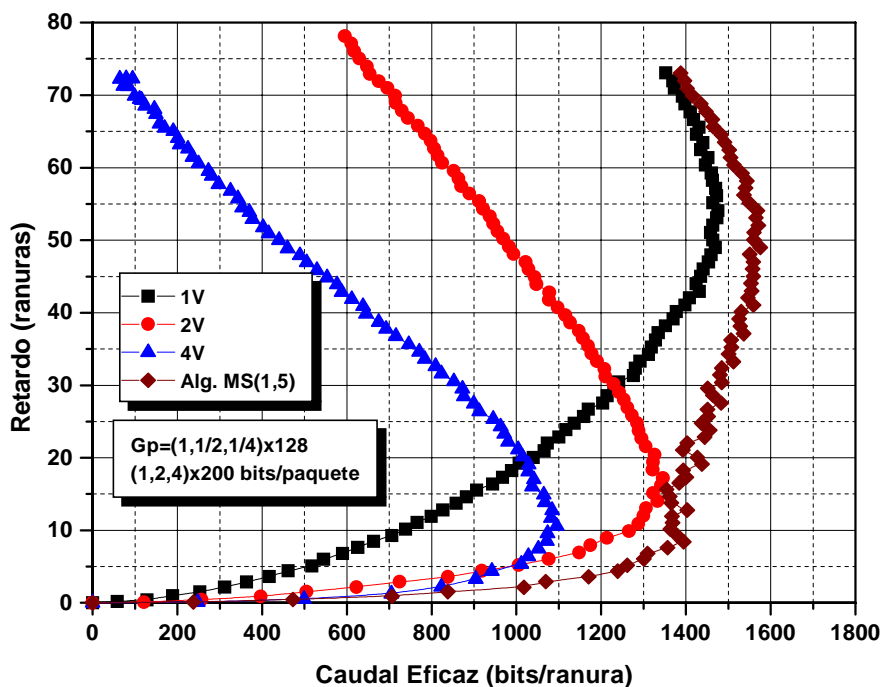


Figura 27. Comportamiento del retardo con el algoritmo  $MS(1,5)$ .

En la [Figura 27](#) observamos que el retardo permanece bajo en la región de bajo tráfico, por lo que se cumple con el objetivo de disminuir el retardo. El comportamiento que se obtiene es porque cuando hay pocos TMs, el número de colisiones se reduce y la interferencia multiusuario es mínima, entonces transmiten con una velocidad alta y el

propio algoritmo ajusta la velocidad dependiendo que sucede en la transmisión. Así que este algoritmo es fácil de implantar, ya que solo se necesita un contador en el TM y éste controla su velocidad de transmisión.

Otra alternativa para controlar adaptivamente el tráfico en el canal radio es por medio de la EB. Los resultados del algoritmo BS-I son presentados a continuación.

### VI.7.3 ALGORITMO BS-I CONTROLADO POR LA ESTACIÓN BASE

El comportamiento obtenido del caudal eficaz con el algoritmo BS-I usando el umbral  $L1=5$  y  $L2=18$ , es mostrado en la [Figura 28](#).

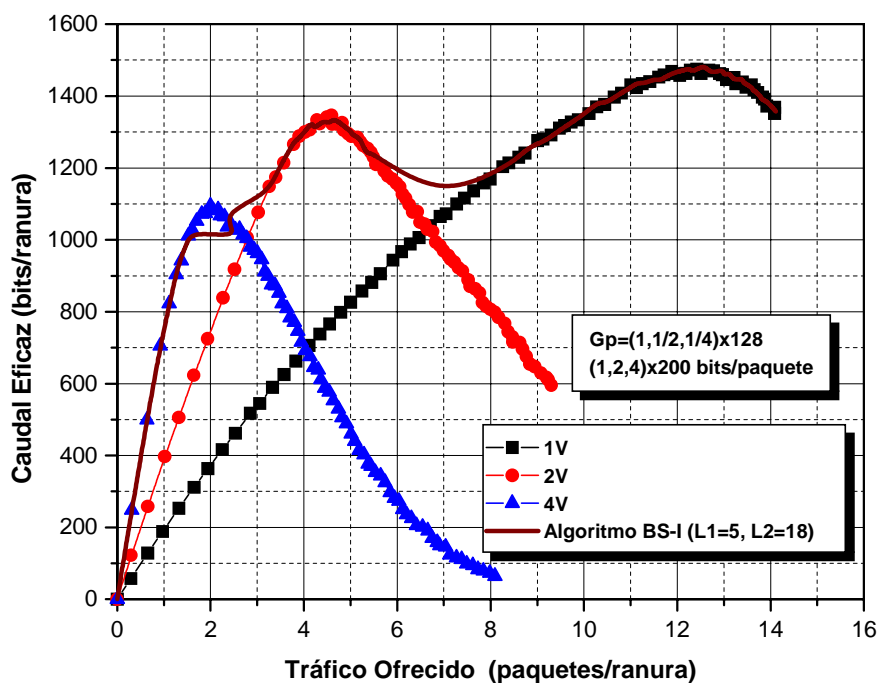


Figura 28. Comportamiento del caudal eficaz con el algoritmo BS-I con umbrales.

En la [Figura 28](#) se muestra el comportamiento del caudal eficaz de acuerdo al algoritmo BS-I, en donde los umbrales fueron calculados de acuerdo a la hipótesis

Gaussiana para cada velocidad de transmisión, donde la EB necesita calcular con anticipación los umbrales dependiendo de cuantas velocidades se van a utilizar. El comportamiento que se observa es debido al uso de los umbrales. En un inicio los TMs empiezan a transmitir con la velocidad más alta, debido a que son pocos los TMs que quieren transmitir y en el momento que empieza a aumentar el tráfico el algoritmo hace que disminuya la velocidad, debido a que se rebasó el umbral para la velocidad de transmisión más alta. En caso de que siga el tráfico aumentado se reduce de nuevo la velocidad, por lo que este algoritmo también se adapta a las condiciones de tráfico en el canal. Dado que este algoritmo funciona para el caso del caudal eficaz, hay que determinar si es adecuado para el retardo. El comportamiento del retardo para el algoritmo BS-I se muestra en la [Figura 29](#).

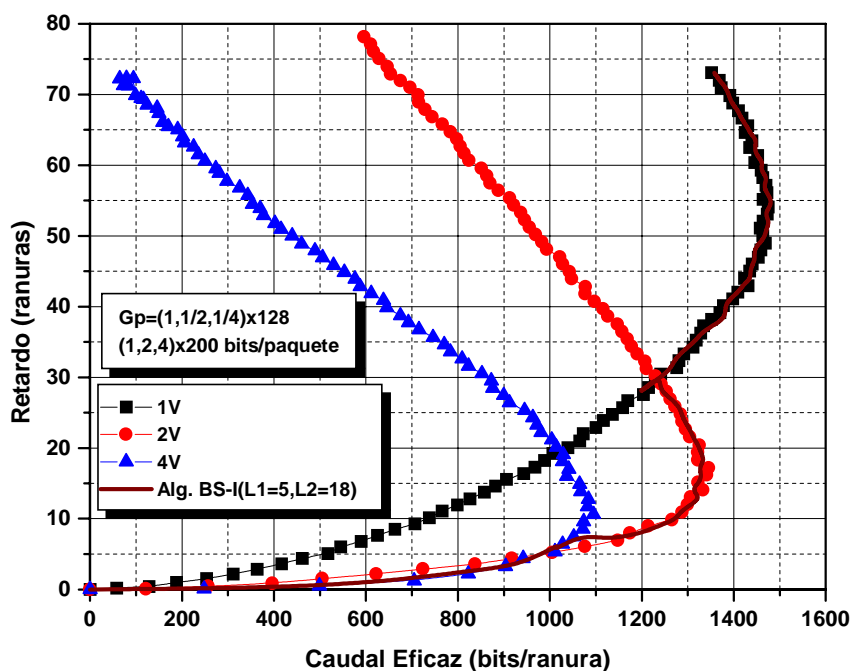


Figura 29. Comportamiento del retardo con el algoritmo BS-I con umbrales.

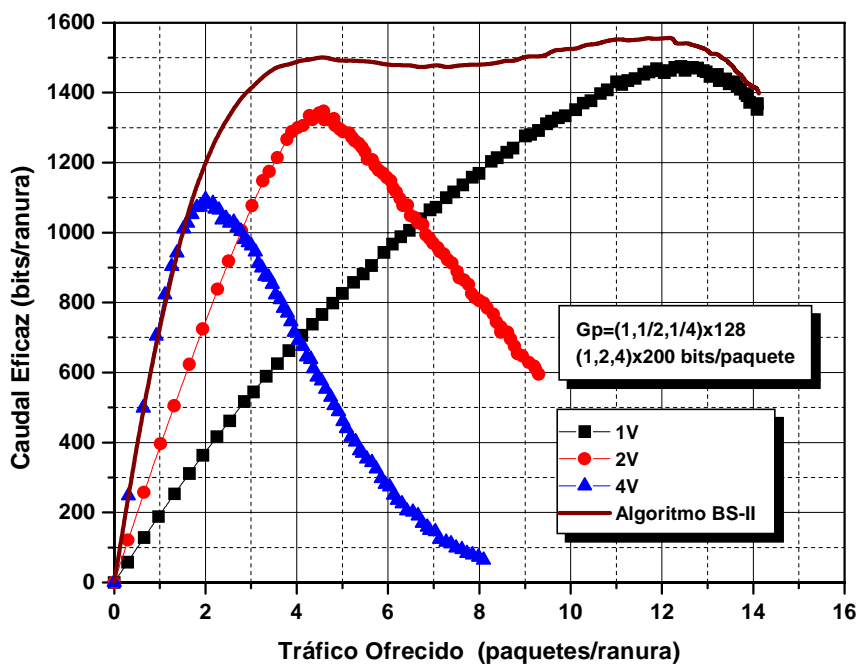
En la [Figura 29](#) observamos que con el algoritmo BS-I se tiene un mejor comportamiento debido a que los límites en los umbrales son los adecuados. Y como se mencionó anteriormente, al usar umbrales lo que está sucediendo es que al inicio hay poco tráfico y se transmite con la velocidad más altas, y la velocidad va disminuyendo

dependiendo conforme se va presentado el tráfico en el canal. Por lo tanto, los umbrales nos sirven para que el sistema se adapte a las condiciones del tráfico en el canal.

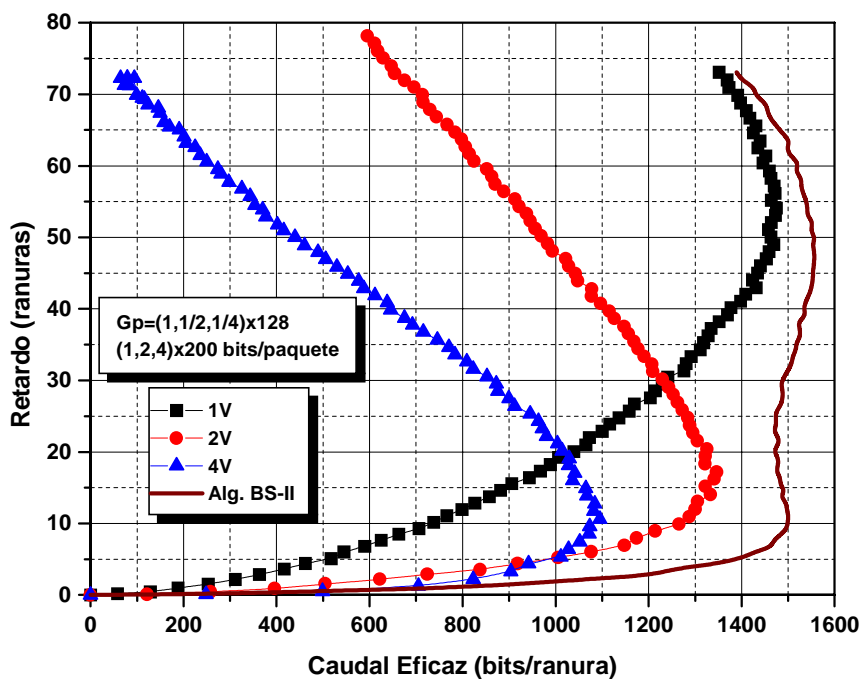
#### **VI.7.4 ALGORITMO BS-II CONTROLADO POR LA ESTACIÓN BASE**

Los dos algoritmos anteriores no hacen uso de la mejor combinación de velocidades, pero el tercer algoritmo (BS-II) si considera esta opción. El comportamiento obtenido para el caudal eficaz se muestra en la [Figura 30](#).

En la [Figura 30](#) observamos el comportamiento del caudal eficaz (Figura 30a) y del retardo (Figura 30b) usando el algoritmo BS-II. Estos comportamientos son debido a que la EB determina cuantos TMs quieren transmitir, y a través de las [ecuaciones \(52\) y \(53\)](#) se hace una búsqueda exhaustiva para determinar cual es la combinación óptima de velocidades para lograr el máximo caudal eficaz, por este motivo este algoritmo toma más tiempo de procesamiento, pero es el más fiable.



a)



b)

Figura 30. Algoritmo BS-II. a) Comportamiento del caudal eficaz, b) comportamiento del retardo.



## VI.8 CONCLUSIONES

El modelado para S-Aloha realizado en el [Capítulo IV y V](#) fue modificado con el objeto de agregar el entorno DS-CDMA. Este nuevo análisis fue hecho a través de cadenas de Markov, logrando determinar las prestaciones del sistema (caudal eficaz y retardo). Para este nuevo análisis, se tomaron las propiedades y características de DS-CDMA. Además, se estudiaron esquemas para transmitir con diferentes velocidades y se realizaron las modificaciones al sistema S-Aloha/DS-CDMA para lograr un sistema adaptable a las condiciones del tráfico considerando solamente datos.

Podemos concluir que la adaptación del tráfico en el canal se puede hacer por medio del TM o por la EB. Con el algoritmo MS solo se necesitó de un contador en el TM, pero se requirió hacer varias pruebas para determinar cual es el valor óptimo para  $\max_{tx}$  y  $\min_{suc}$ . Cuando la EB usa el algoritmo BS-I, ésta tiene que calcular los umbrales dependiendo cual es la velocidad máxima y mínima y para hacer el cálculo de los umbrales fue necesario hacer uso de la hipótesis Gaussiana [[Pursley, 1977](#)].

Para obtener el objetivo general de esta tesis es necesario manejar tráfico multimedia (vídeo, voz y datos). Así mismo, el análisis realizado en la etapa MAC (S-Aloha/DS-CDMA) hay que transportarlo a la siguiente etapa, que es asignación de recursos y así mismo garantizar la calidad de servicio. Esto se trata en el siguiente capítulo.



## **VII ASIGNACIÓN DE RECURSOS Y CALIDAD DE SERVICIO GARANTIZADA PARA SISTEMAS 3G**

### **VII.1 INTRODUCCIÓN**

El protocolo de acceso múltiple S-Aloha/DS-CDMA desarrollado en los capítulos anteriores, se ha centrado a resolver la problemática asociada al acceso del recurso radio. Una vez que los TMs han pasado a la fase de transmisión de sus paquetes, se presenta un nuevo objetivo: atender de manera eficiente los requerimientos de servicio de los TMs para tráfico multimedia, esto se logra a través de un algoritmo de asignación de recursos.

Las políticas para programar el orden de transmisión para tráfico multimedia y la asignación de recursos, tendrán un gran impacto en la eficiencia y prestaciones de protocolos MAC para las futuras redes inalámbricas de tercera generación. Varios criterios pueden ser usados para el diseño de un gestor eficiente, por ejemplo, maximizar el caudal eficaz, minimizar los paquetes perdidos, mantener la calidad de servicio (QoS) y asignar recursos de acuerdo a una estructura de prioridad pre-definida. Varias disciplinas de asignación de recursos han sido propuestas para garantizar las prestaciones de servicio en redes alámbricas, pero proveer QoS en redes móviles es más complejo que en redes fijas, debido a la movilidad y deterioros en el canal inalámbrico, que es altamente dependiente del interfaz aire [Fattah, 2002].

Con el algoritmo de asignación de recursos se puede controlar, de manera efectiva, el retardo experimentado por un paquete desde que éste se genera, hasta que se recibe con éxito. Esto es debido a que maneja cierta prioridad en la transmisión de un paquete, estableciendo de esta manera cierto retardo de un paquete a otro. Además, con este algoritmo se puede establecer, el orden en el cual se llevará a cabo la transmisión de los paquetes que se encuentran en su memoria temporal de los TMs [Shiokawa, 2001].

La misión del algoritmo de asignación de recursos es, por lo tanto, especificar cuándo un TM determinado de entre el conjunto de TMs del sistema tiene permiso para transmitir en cada instante de tiempo, así como la cantidad de información que se puede enviar. Nótese que en un sistema DS/CDMA, este último aspecto estará relacionado directamente con la ganancia de procesamiento, y por lo tanto permite regular la interferencia presente en el sistema y así poder mantener la tasa de error bajo los límites establecidos para cada servicio [Fitzek *et al.*, 2002].

Así, cualquier algoritmo de asignación de recursos y de acceso al canal para redes inalámbricas, debe trabajar dentro de las restricciones impuestas por el canal radio. Al mismo tiempo, con objeto de apoyar la comunicación intensiva en tiempo real y no real para flujos de datos sobre un canal escaso, variante en el tiempo y compartido, el algoritmo de asignación de recursos debe apoyar tanto la sensibilidad al retardo, como la sensibilidad a los errores de los flujos de datos.

En función de lo anterior, se puede decir que el esquema de asignación de recursos para tráfico multimedia debe proporcionar prioridad y equidad en el manejo del ancho de banda del canal de los diferentes TMs dentro del sistema, además de garantizar QoS. Para ello, un esquema posible de asignación de recursos que se adapte bien a las condiciones esperadas en los sistemas móviles de tercera generación sería del tipo de control dinámico centralizado, de tal forma que la EB conocerá en cada momento el número y el tipo de servicio solicitado por los TMs dentro del sistema de comunicaciones. Con ello, la EB

proporcionará al TM los medios para satisfacer sus requerimientos de servicio [Lindemann, 2002].

Por lo tanto, el objetivo de este capítulo es proponer un nuevo esquema de asignación de recursos para redes móviles de tercera generación. Este algoritmo de asignación de recursos debe establecer equidad en la asignación de los recursos, ser flexible en el manejo del ancho de banda, adaptable a las condiciones de tráfico multimedia, y garantizar la calidad de servicio de acuerdo al estándar UMTS (Sistema Universal de Comunicaciones Móviles) [ETSI, 1997]. Para este análisis, el algoritmo de asignación de recursos propuesto debe tomar en cuenta la investigación realizada en los capítulos anteriores (capa MAC).

## VII.2 ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS

En años recientes ha habido un gran crecimiento en la gestión de redes móviles inalámbricas. Con el uso creciente de redes móviles e inalámbricas en ambientes, ya sea para interiores, como para exteriores, ha aparecido el problema de proporcionar equidad en el acceso entre múltiples TMs, que contienden sobre un canal inalámbrico escaso y compartido. En redes alámbricas, la asignación equitativa de recursos ha sido durante mucho tiempo un paradigma para proporcionar equidad en el enlace de acceso. Sin embargo, la adaptación de asignación equitativa de recursos a redes inalámbricas no es trivial, debido a los problemas particulares a los canales inalámbricos, tales como dependencia de localización, aleatoriedad de los errores y la contención por el canal. Por consiguiente, los algoritmos de asignación de recursos propuestos para redes alámbricas no se aplican directamente a las redes inalámbricas.

Recientemente, se han hecho muchos esfuerzos con objeto de adaptar los esquemas de asignación de recursos para redes inalámbricas. Estos nuevos esquemas han sido propuestos para una asignación de recursos en tiempo (*time-scheduling*), los cuales pueden

ser aplicados solamente a redes TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo). Algunos de estos esquemas son IWFQ (sistema ideal de colas equitativo inalámbrico) [Lu *et al.*, 1997], WFS (gestor equitativo inalámbrico) [Lu *et al.*, 1998], WPS (gestor de paquetes inalámbrico) [Lu *et al.*, 1997], [Lu *et al.*, 1999], CIF-Q (sistema de colas equitativo independiente considerando estado del canal) [Ng *et al.*, 1998], WGPS (controlador centralizado inalámbrico) [Jeong *et al.*, 2001], entre otros.

La idea fundamental que se esconde detrás de estos últimos algoritmos, consiste en hacer uso de una política de asignación de recursos de referencia, e incorporar el conocimiento previo del estado del canal, que se supone diferente para cada TM. De este modo, cuando, según el algoritmo de referencia, a un TM le fuera asignado el recurso pero percibiera un canal en malas condiciones, renunciaría a la transmisión en favor de otro TM que dispusiera de un canal más favorable. Este mecanismo introduce una clasificación de los TMs como ‘adelanto’ (*leading*) si han recibido en un instante dado más servicio del que les correspondería según el esquema de referencia; ‘atraso’ (*lagging*) si han recibido menos servicio, o bien ‘satisfecho’ (*satisfied*) si la cantidad de servicio recibida coincide con la que se hubiera recibido según el esquema de referencia. Con base a esta clasificación, se establecen mecanismos de compensación para reducir el exceso de servicio de los TMs con ‘adelanto’ a favor de los que se encuentren en situación de ‘atraso’ [Hoang, 2002].

En cualquier caso, debe especificarse que todas estas estrategias están orientadas hacia sistemas de transmisión basados en la técnica TDMA/FDMA, presuponiendo que es posible conocer previamente y de forma centralizada el estado del canal para cada TM. Sin embargo, al considerarse una técnica de acceso como DS/CDMA limitada por interferencias, y en la que no existe un límite rígido respecto del número de transmisiones que pueden aceptarse, se depende de las ganancias de procesamiento empleadas y de la máxima tasa de error que puede tolerarse. Los algoritmos anteriores no son directamente aplicables, pues todos ellos asumen que únicamente un TM puede ocupar el canal simultáneamente. De hecho, en DS/CDMA, el concepto de algoritmo de asignación de recursos no se limita

únicamente a un reparto temporal, sino que va más allá, al incorporarse también la necesidad de decidir sobre parámetros de la transmisión tales como la ganancia de procesamiento. Así regula la interferencia total, de modo que todos los TMs aceptados para transmitir vean satisfechos sus requerimientos de tasa de error. Por lo cual, este esquema de asignación de recursos basado en velocidades (*rate-scheduling*), donde pueden transmitir los TMs con diferentes velocidades y por lo tanto manejar distintas ganancias de procesamiento.

Con base al contexto planteado, y de forma genérica, el modo de operación de un algoritmo de asignación de recursos para DS-CDMA, consistiría en partir de un conjunto de TMs con sus correspondientes necesidades de transmisión y requerimientos de QoS, y llevar a cabo dos procesos básicos:

- **Priorización:** Consiste en ordenar los diferentes TMs que han logrado el acceso a los códigos en base a algún tipo de criterio preestablecido. Además, se toma en cuenta las diferentes necesidades de cada uno en términos de las garantías de QoS.
- **Asignación de recursos:** Partiendo de la ordenación llevada a cabo por la priorización, este proceso es responsable de aceptar o rechazar las diferentes transmisiones, según la regulación de la interferencia, determinando las ganancias de procesamiento de cada una de ellas.

En relación al cálculo de la ganancia de procesamiento, nótese que puede efectuarse basándose en un proceso totalmente centralizado, en que la EB calcula cual es la ganancia más apropiada para cada petición aceptada.

Podemos decir, que el problema de proveer un algoritmo de asignación de recursos que garantice QoS para tráfico multimedia, ha ganado interés en los años recientes. Los algoritmos de asignación de recursos propuestos por [Huang, 2001], [Huang, 2002], [Agnētis, 2003], [Hernandez *et al.*, 2002] solo manejan voz y datos, carecen de un control de velocidades y no presentan un método para controlar las peticiones de código. El trabajo reportado por [Kwak *et al.*, 2002], carece de un esquema de control de velocidades; por lo

cual, no se logra una adaptabilidad del tráfico en el canal. El análisis presentado en [Kumaran, 2003] no hace referencia a multiservicios (tráfico multimedia). En los trabajos de [Andreadis *et al.*, 2002] y [Jeong, *et al.*, 2002] se propone un algoritmo de asignación de recursos basado en velocidades de transmisión fijas. En [Xu *et al.*, 2002] se emplea múltiples velocidades de transmisión, pero éste no ha sido bien direccionado, porque el controlador centralizado maneja números reales positivos fijos, llamados pesos, para asignar el mínimo ancho de banda; además, no presenta un control en la asignación de los códigos.

Por lo tanto, nosotros proponemos un nuevo algoritmo de asignación de recursos, llamado CDMA/GPS-DW (acceso múltiple por división de código/controlador centralizado con pesos dinámicos) [Mendez y Covarrubias, 2003], [Mendez *et al.*, 2003]. Este algoritmo provee un control en las peticiones de código, asigna dinámicamente el ancho de banda, y está basado en múltiples velocidades (*rate scheduling*). Además, es adaptable a las condiciones del tráfico para multiservicios (vídeo, voz y datos) y garantiza calidades de servicio. El funcionamiento de nuestro algoritmo es desarrollado en los siguientes apartados.

### **VII.2.1 ESQUEMA DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS CDMA/GPS-DW**

Para este análisis, se supone solo el enlace ascendente (TM-EB), considerando una sola celda para un sistema WCDMA. También es considerado un duplexado por división de frecuencia, con un control de potencia perfecto y un canal libre de errores, donde los paquetes arriban a los TMs de acuerdo a un proceso aleatorio. La Figura 31 ilustra el modelo propuesto para este análisis.

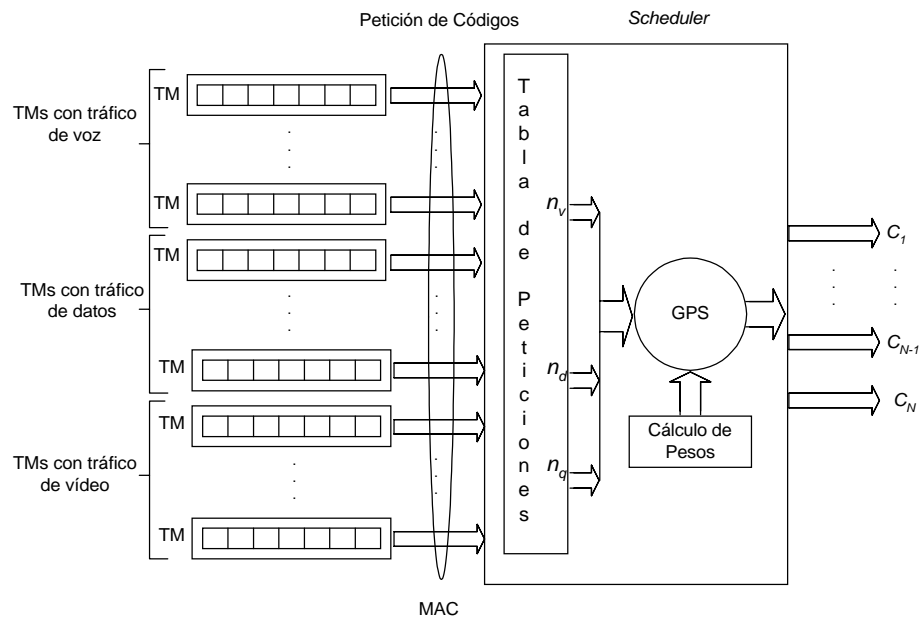


Figura 31. Modelo del sistema propuesto para un esquema de asignación de recursos CDMA/GPS-DW.

El funcionamiento del esquema de asignación de recursos para WCDMA de la Figura 31 se puede analizar a través del diagrama a flujo que se ilustra en la Figura 32 [Mendez *et al.*, 2003]. Hay que tomar en cuenta, que en este esquema se considera la etapa MAC estudiada en los capítulos anteriores.

El funcionamiento de este algoritmo se explica a continuación: cada TM en estado de vacío puede generar paquetes de acuerdo a sus modelos de fuentes de tráfico. Para esto, se debe que considerar el tipo de servicio a manejar, con sus respectivas calidades de servicio y sobre todo la característica del interfaz aire, que puede ser o no sensible al tipo de modelo de fuente de tráfico. De acuerdo al estándar UMTS, el tráfico para servicio de datos de tipo WWW, se modela como una distribución de Pareto [ETSI, 1997]. Para servicios de voz y vídeo (*videophone*) en tiempo real, se considera como el modelo de tráfico ON-OFF [Xie *et al.*, 2000].



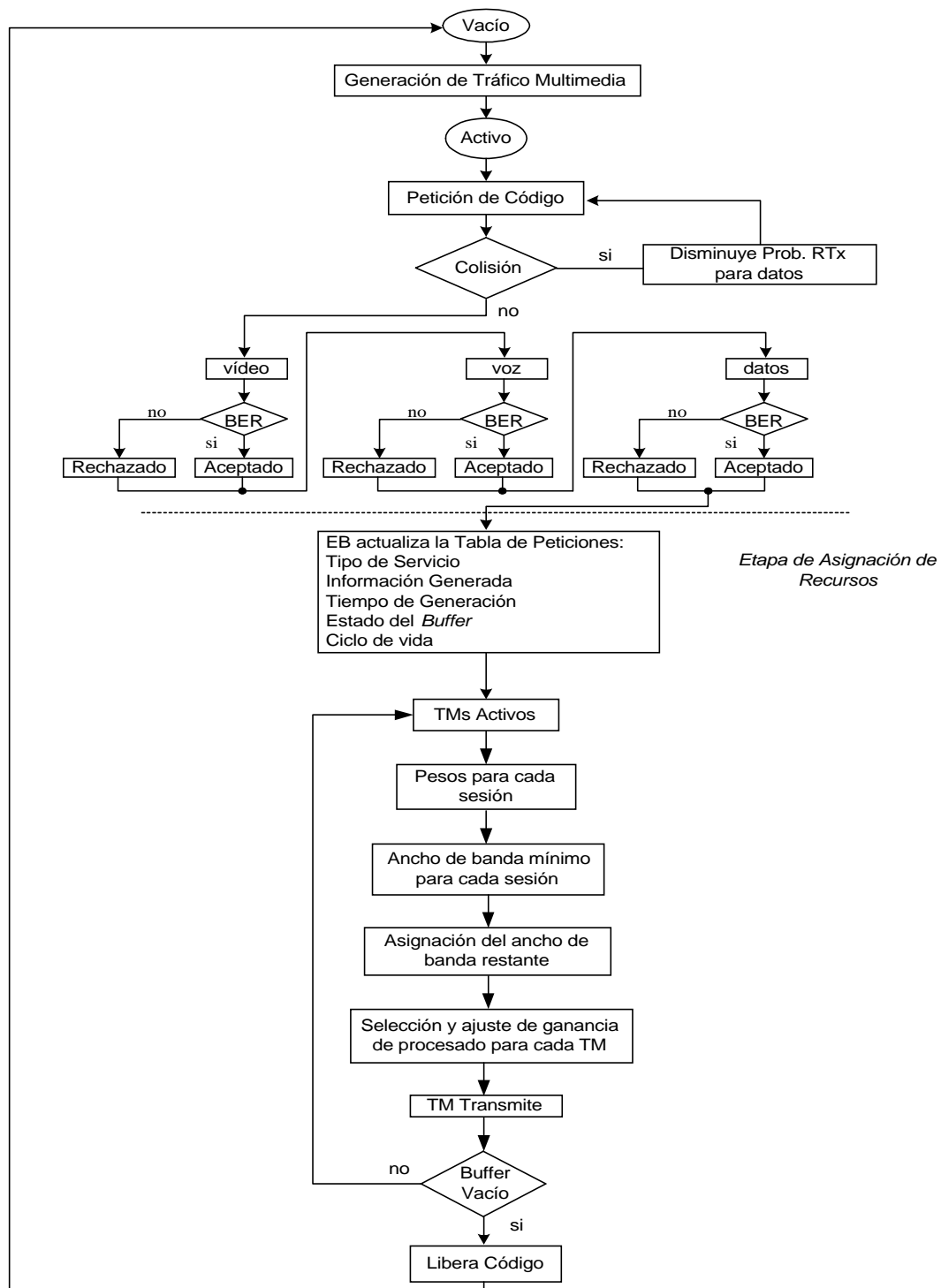


Figura 32. Diagrama de flujo del esquema de asignación de recursos CDMA/GPS-DW.

Siguiendo con el funcionamiento del algoritmo propuesto, en el instante que un paquete es generado, el TM conmuta a un estado activo. En este estado el TM hace la petición para transmitir usando S-Aloha (canal RACH) como una parte del protocolo CDMA, donde un TM escoge aleatoriamente un código de un grupo disponible, mencionando que en el sistema hay más TMs que códigos. Una colisión ocurre cuando dos o más TMs escogen el mismo código y los TMs involucrados tendrán que contender en la siguiente ranura de tiempo disponible. Una petición para transmitir es rechazada cuando no haya códigos disponibles, o no garantice la BER para cada tipo de tráfico.

Para la asignación de códigos, la EB toma en cuenta la prioridad en los servicios, donde el servicio de vídeo tiene la prioridad más alta y los datos de tipo WWW la más baja. Con esta condición, lo primero que hace la EB, de acuerdo a la información que tiene en su tabla de peticiones (TP), es asignar los códigos a los TMs que tengan su memoria temporal llena, asignando primero recursos a los TMs con tráfico de vídeo. En caso de que haya más TMs de vídeo que códigos disponibles, el criterio a tomar por la EB es que de los TMs aún con memoria temporal llena, se le asignará recursos a aquellos TMs que no se les asignó código en las ranuras de tiempo previas. Si hubo suficientes códigos para los TMs con tráfico de vídeo, entonces los códigos restantes se asignan a los TMs con tráfico de voz, siguiendo la misma lógica que se aplicó al servicio de vídeo. Por último, se asignan códigos a datos tomando en cuenta lo mencionado anteriormente. Si después de asignar los códigos a los TMs que tenían su memoria temporal llena quedan aún códigos, se asignan los códigos restantes a los TMs próximos a expirar en su tiempo de vida, considerando el mismo proceso que se siguió para una memoria temporal llena. Por último, si todavía hay códigos después de asignarlos de acuerdo a los criterios de memoria temporal llena y tiempo de vida, los códigos restantes se irán asignando por prioridad de servicio, primero a vídeo, seguido de voz y por último datos. En esta asignación de cada código, la EB determina si se garantiza la BER para cada tipo de tráfico, y en el momento que no se garantice la BER para tráfico multimedia, la EB rechaza las peticiones de código a pesar de que haya códigos disponibles.

Una vez que la EB reconoce esta petición, usará un esquema de asignación de recursos centralizado similar a los descritos en [Karol *et al.*, 1995], [Covarrubias, 1999]. Tan pronto como las peticiones de transmisión de los TMs han sido reconocidas, la EB actualiza la TP. Esta TP consiste de la siguiente información: número de paquetes en la memoria temporal del TM, tipo de servicio, tiempo de vida del paquete, y la ranura de tiempo específica en el cual fue generado el paquete.

Después de asignar los códigos a los TMs, la EB conoce cuantos TMs son de vídeo, voz y datos, además del ancho de banda que cada TM está solicitando, por lo tanto, a través del esquema GPS (controlador centralizado) [Parekh, 1993] se calcula el ancho de banda mínimo para cada servicio. Para obtener esto, es necesario calcular los pesos para cada sesión dinámicamente, tomando en cuenta la cantidad de TMs para vídeo, voz y datos, el ancho de banda y la BER para cada sesión. El ancho de banda restante se asigna en proporción al peso de cada sesión. Lo que resta es seleccionar y ajustar la ganancia de procesamiento de cada TM y transmitir en la ranura de tiempo correspondiente. Si después de transmitir el TM no hay más información en la memoria temporal del TM, éste libera el código y pasa a un estado de vacío. En caso de que el TM tenga más información que transmitir se lo indica a la EB, por lo que no debe de contender otra vez, solamente ajustará su ganancia de procesamiento en la siguiente ranura de tiempo para poder transmitir.

Como se mencionó previamente, la asignación de código para cada TM es hecha por la EB; por consiguiente, la EB conoce el número de TMs activos para cada servicio (vídeo, voz y datos). En el siguiente apartado se analiza cómo se lleva a cabo la aceptación o rechazo de la petición de código tomando en cuenta la BER.

### **VII.2.2 CONTROL DE PETICIÓN DE CÓDIGOS PARA CDMA/GPS-DW**

Un algoritmo de control de admisión se emplea para administrar las peticiones de códigos basado en los recursos disponibles en el sistema CDMA y la QoS requerida. Este control de

admisión siempre se ejecuta cuando un TM inicia la comunicación (RACH), asegurando con esto que la interferencia creada después de sumar una nueva petición no exceda un umbral específico (relación señal a interferencia) [Mendez y Covarrubias, 2003].

La asignación de códigos está restringida a cumplir con los requerimientos de  $SNR$  (relación señal a interferencia) para tráfico multimedia. Por lo tanto, una nueva petición de código es admitida si cumple con la  $SNR$  requerida

$$\frac{1}{SNR_{threshold}} - \frac{1}{SNR_i} > 0, \quad (64)$$

donde  $SNR_{threshold}$  es el umbral de  $SNR$ , la  $SNR_i$  es la  $SNR$  del sistema si es aceptada la  $i$ -ésima petición.

De acuerdo a [Pursley, 1977] y [Liberti, 1999] la  $SNR$  promedio para un sistema CDMA es obtenida mediante (solo tráfico de datos)

$$SNR = \left[ \frac{2(N-1)}{3P_G} + \frac{n_o}{E_b} \right]^{-1}, \quad (65)$$

donde  $E_b$  es la energía de bit,  $P_G$  es la ganancia de procesado,  $N$  denota el número de TMs activos,  $n_o$  es la densidad del espectro de potencia de ruido AWGN. Debido a que el esquema de modulación es BPSK o QPSK, y se considera una detección coherente y transmisión asíncrona, la probabilidad de error en el bit  $P_b$  puede ser descrita mediante

$$P_b = Q(\sqrt{2 \cdot SNR}). \quad (66)$$

Si el tipo de tráfico transmitido incluye vídeo, voz y datos, entonces la relación señal a interferencia de una llamada de voz  $SNR_v$  es descrita mediante

$$SNR_v = \frac{E_b^v}{n_o + \frac{n_v - 1}{\frac{3}{2}P_{G_v}} \alpha_v E_b^v + \frac{n_d}{\frac{3}{2}P_{G_d}} E_b^d + \frac{n_q}{\frac{3}{2}P_{G_q}} E_b^q}, \quad (67)$$

donde  $E_b^v$  es la energía de bit de un TM de voz,  $E_b^d$  es la energía de bit de un TM de datos,  $E_b^q$  es la energía de bit de un TM de vídeo,  $n_v$  es el número de TMs activos de voz,  $n_d$  es el número de TMs activos de datos,  $n_q$  es el número de TMs activos de vídeo,  $P_{G_v}$  es la ganancia de procesamiento de TMs de voz,  $P_{G_d}$  es la ganancia de procesamiento de TMs de datos,  $P_{G_q}$  es la ganancia de procesamiento de TMs de vídeo,  $\alpha_v$  es el factor de actividad de voz. Similarmente, la  $SNR_d$  de una llamada de un TM de datos y la  $SNR_q$  de una llamada de un TM de vídeo son dadas como

$$SNR_d = \frac{E_b^d}{n_o + \frac{n_d - 1}{\frac{3}{2}P_{G_d}} E_b^d + \frac{n_v}{\frac{3}{2}P_{G_v}} \alpha_v E_b^v + \frac{n_q}{\frac{3}{2}P_{G_q}} E_b^q}, \quad (68)$$

$$SNR_q = \frac{E_b^q}{n_o + \frac{n_q - 1}{\frac{3}{2}P_{G_q}} E_b^q + \frac{n_v}{\frac{3}{2}P_{G_v}} \alpha_v E_b^v + \frac{n_d}{\frac{3}{2}P_{G_d}} E_b^d}. \quad (69)$$

Si la EB recibe la misma densidad de potencia de cada TM, entonces  $SNR_v = SNR_d = SNR_q = SNR_{system}$  y  $E_b^d = E_b^v = E_b^q = E_b$ .

En nuestro sistema, el flujo de información de voz y vídeo son continuos, por lo cual la velocidad de canal es fija y la ganancia de procesamiento constante. En cambio, el flujo de información de datos no es continuo, por este motivo la velocidad de canal es variable y la ganancia de procesamiento no es constante, por lo que se requiere un control dinámico de la ganancia de procesamiento. Tomando en cuenta el análisis del control dinámico de la ganancia

de procesado hecho en el [Capítulo VI](#), éste ahora debe ser modificado debido a que se considera un tráfico multimedia.

Considerando un ancho de banda constante y tomando como referencia una velocidad de transmisión de  $r$  bps, una longitud de paquete de  $B$  bits y una ganancia de procesado  $P_G$ , la velocidad de transmisión debe ser incrementada por un factor  $\beta$  ( $\beta > 1$ ) a expensas de una reducción en la capacidad. Esto es, transmitiendo a una velocidad de  $\beta r$  bps, la ganancia de procesado debe ser reducida de acuerdo a  $P_G/\beta$ . Sin embargo, en esta reducción de la ganancia de procesado se tiene que aumentar la velocidad de transmisión y por lo tanto, la información transmitida es  $\beta B$  bits.

El control dinámico de la ganancia de procesado debe ser capaz de maximizar el número de bits recibidos correctamente, para un periodo de duración de paquete dado, seleccionando la combinación óptima de velocidades ( $zr, \dots, 2r, r$  bps) en cualquier ranura de tiempo, dependiendo del número activo de TMs (es decir, el nivel de interferencia).

La mejor combinación de velocidades de transmisión, debe ser obtenida después de una búsqueda exhaustiva para un tráfico multimedia (ver [Ecuación \(70\)](#)), donde  $n_{d_r}$  es el número de TMs de datos transmitiendo a una velocidad de  $r$  bps,  $n_{d_{2r}}$  es el número de TMs de datos usando  $2r$  bps y  $n_{d_{zr}}$  es el número de TMs de datos transmitiendo a  $zr$  bps.  $n_v$  es el número de TMs de voz transmitiendo a  $r$  bps y  $n_q$  el número de TMs de vídeo transmitiendo con  $6r$  bps.

$$\begin{aligned} & \max_{(n_{d_{1r}}, n_{d_{2r}}, \dots, n_{d_{zr}}, n_v, n_q)} S(n_{d_{1r}}, n_{d_{2r}}, n_{d_{3r}}, \dots, n_{d_{zr}}, n_v, n_q) \\ & \text{sujeto a} \quad n_d = n_{d_{1r}} + n_{d_{2r}} + n_{d_{3r}} + \dots + n_{d_{zr}} \end{aligned} \quad (70)$$

Además,  $S$  es el caudal eficaz con la combinación de las velocidades de transmisión y debe cumplir con  $\frac{1}{SNR_{threshold}} - \frac{1}{SNR_i} > 0$ . Entonces, el caudal eficaz es calculado de acuerdo con la [Ecuación \(71\)](#), donde la probabilidad de recibir correctamente un paquete es  $P_{c,(\beta r)}(n_{d_r}, n_{d_{2r}}, \dots, n_{d_{zr}}, n_v, n_q)$ , y éste depende de las velocidades de transmisión asociadas a cualquier combinación de  $(n_{d_r}, n_{d_{2r}}, \dots, n_{d_{zr}}, n_v, n_q)$ , debido a que la interferencia causada por diferentes clases de TMs no es la misma.

$$S(n_{d_r}, n_{d_{2r}}, \dots, n_{d_{zr}}, n_v, n_q) = \sum_{y=1}^z \left( n_{d_{yr}} \left( P_{c,(yr)}(n_{d_r}, n_{d_{2r}}, \dots, n_{d_{zr}}) \right) \times y \cdot B \right) + n_v P_{c,(1r)} \times 1 \cdot B + n_q P_{c,(6r)} \times 6 \cdot B, \quad (71)$$

Nótese que las expresiones usadas para evaluar la relación señal a interferente  $SNR$  ([ecuaciones \(67\)-\(69\)](#)) deben ser modificadas con objeto de tomar en cuenta que el canal será compartido por TMs con diferentes velocidades ([Ecuación 72](#)).

$$SNR_i = (SNR_{system})_{\beta r} = \frac{1}{\frac{n_o}{E_b} + \frac{\left( \sum_{\substack{y=1 \\ y \neq \beta}}^z y \times n_{d_{ir}} + \beta \times (n_{d_{\beta r}} - 1) \right)}{\frac{3}{2} P_G} + \frac{N_v}{\frac{3}{2} P_{G_v}} \alpha_v + \frac{N_q}{\frac{3}{2} P_{G_q}}} . \quad (72)$$

Considerando  $n_{d_{\beta r}}$  como TMs transmitiendo con  $\beta r$  bps ( $\beta = 1, 2, \dots, z$ ) y  $P_G$  siendo la ganancia de procesamiento obtenida cuando se transmite a  $r$  bps ( $\beta = 1$ ), la probabilidad de recibir con éxito un paquete bajo un control de potencia perfecto puede ser calculada mediante las [ecuaciones \(73\)-\(74\)](#).

$$P_{c,(\beta r)}(n_{d_r}, n_{d_{2r}}, \dots, n_{d_{zr}}, n_v, n_q) = (1 - P_{b,(\beta r)}(n_{d_r}, n_{d_{2r}}, \dots, n_{d_{zr}}, n_v, n_q))^{\beta B}. \quad (73)$$

$$P_{b,(\beta r)}(n_{d_r}, n_{d_{2r}}, \dots, n_{d_{zr}}, n_v, n_q) = Q\left(\sqrt{2 \cdot (SNR_{system})_{\beta r}}\right). \quad (74)$$

Basado en el procedimiento anterior, la EB determina la ganancia de procesamiento de cada TM con tráfico multimedia.

Después de asignar los códigos a los TMs, la EB conoce el número de TMs activos de vídeo, voz y datos, así como el ancho de banda que cada TM está solicitando. Debido a que el algoritmo GPS calcula el mínimo de ancho de banda requerido para cada sesión, es necesario calcular los pesos de manera dinámica para cada sesión y el ancho de banda en exceso es asignado en proporción a los pesos de cada sesión. Basado en esta información, la EB selecciona y ajusta la ganancia de procesamiento de cada TM listo para transmitir en la siguiente ranura de tiempo disponible. Si después de transmitir, un TM no tiene más información en su memoria temporal, éste libera su código y conmuta a un estado vacío. En caso de que el TM tenga posteriormente más información que transmitir, debe otra vez contender por el código en la siguiente ranura de tiempo.

### **VII.2.3 ASIGNACIÓN DEL ANCHO DE BANDA MÍNIMO PARA CDMA/GPS-DW**

Para la asignación del mínimo de ancho de banda para cada sesión, se usa el esquema GPS (controlador centralizado), también conocido como FFQ (sistema de colas equitativa de fluidos), que está basado en un modelo de tráfico de fluidos.

La estrategia de los esquemas de asignación equitativa de recursos para redes TDMA, está basado en tiempo, usado para remediar las garantías de equidad, donde la velocidad de canal para cada TM es fija. Para el esquema propuesto CDMA/GPS-DW está basado en velocidades [Mendez y Covarrubias, 2003], [Mendez *et al.*, 2003], donde diferentes TMs en el mismo flujo pueden transmitir su información con diferentes velocidades. Esto es conseguido en nuestro caso variando la ganancia de procesamiento, en lugar de asignar tiempo de servicio. Además, los esquemas de asignación equitativa de recursos para redes TDMA están basados en el concepto de tiempo virtual [Lu *et al.*, 1997], [Lu *et al.*, 1998], [Lu *et al.*, 1999], [Ng *et al.*, 1998], [Jeong *et al.*, 2001].



La capacidad total de enlace  $C$  en el esquema CDMA/GPS-DW es compartida por  $N$  sesiones. Cada sesión  $i$  mantiene una conexión con velocidad de enlace  $C_i(k)$  durante la  $k$ -ésima ranura de tiempo, tal que

$$\sum_{i=1}^N C_i(k) \leq C . \quad (75)$$

Sea  $\phi_i$  el peso para la sesión  $i$ , donde  $i=1, 2, \dots, N$ ,  $N = n_d + n_v + n_q$  y  $W_i(k)$  la cantidad de tráfico ofrecido durante la  $k$ -ésima ranura de tiempo, entonces, de acuerdo a la disciplina de asignación de recursos de GPS, la siguiente relación debe ser mantenida para cualquier sesión que está bloqueada continuamente en la ranura de tiempo  $k$ , es decir,

$$\frac{W_i(k)}{W_j(k)} \geq \frac{\phi_i}{\phi_j}, \quad j=1, 2, \dots, N. \quad (76)$$

La cantidad de tráfico bloqueado de la sesión  $i$ , durante la ranura de tiempo  $k$ , es el tráfico bloqueado en la ranura de tiempo previa, más el tráfico estimado de la sesión  $i$  durante la ranura de tiempo  $k$ . Si el tráfico bloqueado es cero entonces el tráfico servido es cero, y en caso de que el tráfico bloqueado no es cero el tráfico servido de la  $i$ -ésima sesión es

$$W_i(k) = g_i T , \quad (77)$$

donde

$g_i = \frac{\phi_i}{\sum_{j=1}^N \phi_j} C$  es la velocidad mínima garantizada para la sesión  $i$ ,  $T$  es la longitud de la

ranura de tiempo y  $C$  es la máxima cantidad de servicio que puede ser provista por la red.

La velocidad asignada a la sesión  $i$  puede ser determinada por  $C_i(k) = \frac{W_i(k)}{T}$ , así el ancho de banda asignado a cada sesión (TMs de vídeo, voz y datos de WWW) viene dado por

$$C_i(k) = \frac{\phi_i}{\sum_{j=1}^N \phi_j} C, \quad (78)$$

y el ancho de banda restante será distribuido proporcionalmente al peso individual de cada sesión  $\phi_i$ .

En el esquema usado en [Xu *et al.*, 2002] los pesos fijos son relacionados de la siguiente manera:

$$\phi_1 = \frac{1}{2}\phi_2 = \frac{1}{3}\phi_3 = \dots = \frac{1}{N-1}\phi_{N-1} = \frac{1}{N}\phi_N. \quad (79)$$

Nosotros proponemos una asignación dinámica de pesos, donde un mínimo de ancho de banda es garantizado para cada sesión.

### VII.2.3.1 Asignación dinámica de pesos

En un sistema CDMA, el ancho de banda total en función de la ganancia de procesado es dado como [I, 1995]

$$\sum_{i=1}^N R_i \cdot P_{G_i} = B_T, \quad (80)$$

donde  $R_i$  es la velocidad de transmisión asignada al  $i$ -ésimo TM,  $B_T$  es el ancho de banda total (capacidad de enlace total),  $P_{G_i}$  es la ganancia de procesado del  $i$ -ésimo TM y  $N$  es el

número de TMs activos. De acuerdo a las ecuaciones (78) y (80), podemos obtener  $R_i = C_i$ ,

$$B_T = C \text{ y } \frac{1}{P_{G_i}} = \frac{\phi_i}{\sum_{j=1}^N \phi_j}.$$

Por lo tanto,

$$\begin{aligned} \phi_1 \cdot P_{G_1} &= \sum_{j=1}^N \phi_j, \phi_2 \cdot P_{G_2} = \sum_{j=1}^N \phi_j, \dots, \phi_N \cdot P_{G_N} = \sum_{j=1}^N \phi_j, \\ \phi_1 \cdot P_{G_1} &= \phi_2 \cdot P_{G_2} = \dots = \phi_N \cdot P_{G_N}. \end{aligned} \quad (81)$$

Esto indica que para obtener los pesos dinámicos para el esquema CDMA/GPS-DW, la EB debe calcular la ganancia de procesamiento para cada TM (ver apartado VII.2.2) en cada ranura de tiempo. Como fue mencionado previamente, el flujo de información para vídeo y voz es continuo, por lo cual la ganancia de procesamiento para voz y vídeo es fija  $P_{G_v} = P_G = 256$  y  $P_{G_q} = P_G/6 = 256/6$ , respectivamente.

Es necesario tener en cuenta que el tráfico de vídeo y voz representan flujos continuos de información. Por lo tanto, el ancho de banda restante solamente es asignado a los TMs con tráfico de datos-WWW porque el tráfico de vídeo y voz, ambos en tiempo real, no pueden incrementar su velocidad de transmisión.

El análisis previo muestra que podemos hacer una distinción de servicios (vídeo, voz y datos-WWW) que nos permitirá garantizar la QoS, en nuestro caso retardo y porcentaje de paquetes descartados. Los resultados de la evaluación de prestaciones de este esquema son presentados en el siguiente apartado.

### VII.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS NUMÉRICO

El proceso de simulación para evaluar las prestaciones del esquema CDMA/GPS-DW se implementó mediante un programa en Lenguaje C. Específicamente, evaluamos las prestaciones del sistema en un ambiente de una sola celda, considerando solamente el enlace ascendente (TM-EB), libre de errores y un control perfecto de potencia. Además, los parámetros de simulación corresponden a la norma UMTS y se consideran las siguientes fuentes de tráfico:

- Tráfico de voz: se considera la generación de patrones de habla en una conversación, y está basado en el modelo de Markov para un detector lento de voz [Xie *et al.*, 2000].
- Tráfico de vídeo (*videophone*): se supone un flujo continuo de bits. El tiempo de transmisión es asumido como exponencialmente distribuido, con una media igual a 180 s [Xie *et al.*, 2000].
- Tráfico de datos de tipo WWW: se considera el modelo presentado en [ETSI, 1997] que es referido al estándar UMTS, donde la aplicación de servicio sigue una distribución de Pareto con valores fijos de  $\alpha=1.1$  y  $k=81.5$  y un tamaño máximo de ráfaga de 66,666 bytes.

Debido a que varios tipos de tráfico existen juntos en el sistema, éste debe observar lo más estrictamente posible la  $SNR$ . Es decir, la  $SNR_{threshold}$  es causada por el requerimiento de tráfico de datos.

Además, las prestaciones del sistema están limitadas solamente por interferencia, por lo tanto el ruido térmico se desprecia.

Los valores de los parámetros de simulación más importantes están dados en la [Tabla X \[ETSI, 1997\]](#), donde la ganancia de procesamiento es variable para datos de tipo WWW y debido a que para voz y vídeo el flujo de información es continuo la ganancia de procesamiento es fija.

Tabla X. Parámetros de simulación para el algoritmo de asignación de recursos CDMA/GPS-DW.

Parámetro	Valor
Ancho de banda	5.0 MHz
Velocidad de canal para WCDMA	2.0 Mbps
Velocidad de chip	4.096 Mcps
Modulación	BPSK (enlace ascendente)
Ganancia de procesado para datos	Variable
Velocidad de la fuente de voz	16 kbps
Velocidad de la fuente de datos	16 a 384 kbps
Velocidad de la fuente de vídeo	96 kbps
Duración de la ranura de tiempo ( <i>slot</i> )	0.625 ms
Número total de TMs de vídeo	50
Número total de TMs de voz	50
Número total de TMs de datos	100
Duración promedio de la ráfaga de voz	1.41 s
Duración promedio de silencio para voz	1.74 s
Duración promedio de la llamada de vídeo	180 s
BER máximo tolerable para tráfico de vídeo	$10^{-5}$
BER máximo tolerable para tráfico de voz	$10^{-3}$
BER máximo tolerable para tráfico de datos	$10^{-9}$

La primera simulación estudia el porcentaje de paquetes descartados (vídeo y voz), tomando en cuenta que debe cumplir con la QoS para voz y vídeo, con un máximo del 1% de paquetes descartados. Los resultados obtenidos para este caso se muestran en la [Figura 33](#).

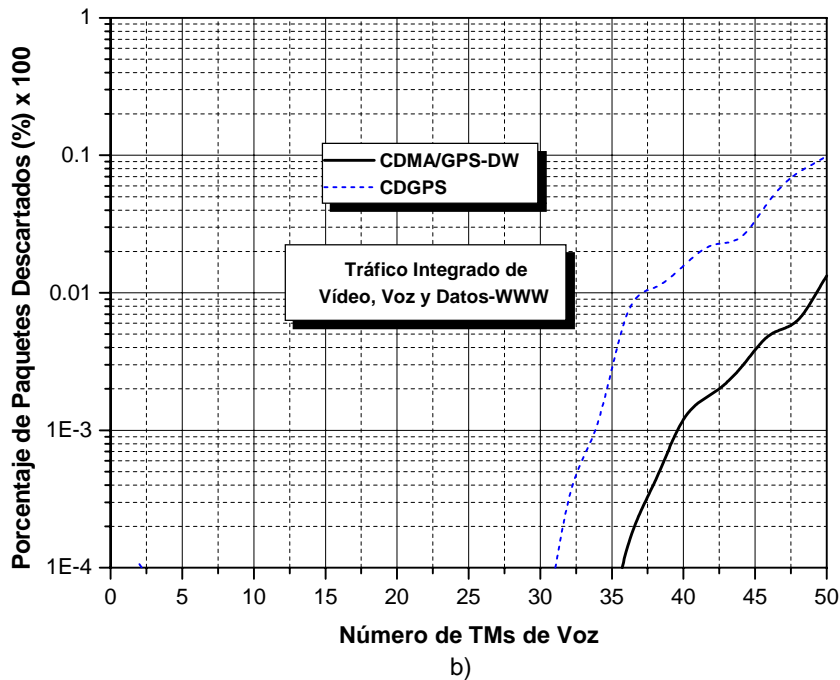
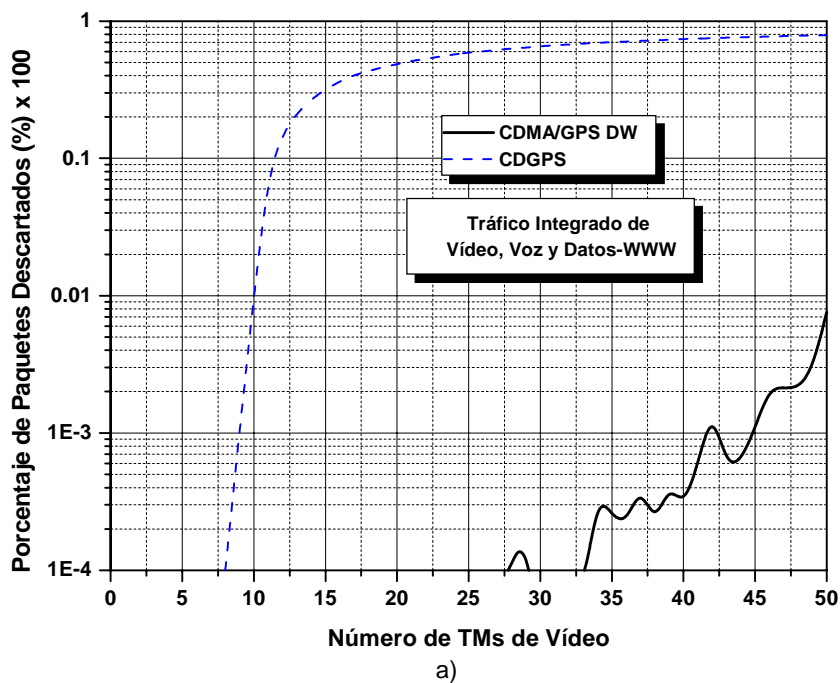


Figura 33. Porcentaje de paquetes descartados para a) vídeo y b) voz para los esquemas CDMA/GPS-DW y CDGPS.

En la [Figura 33a](#) se observa que si fijamos el porcentaje de paquetes descartados a un nivel de 1%, entonces el esquema CDGPS [Xu, *et al.*, 2002] solamente puede soportar 10 TMs con tráfico de vídeo en un ambiente de multimedia, mientras nuestro esquema propuesto CDMA/GPS-DW se presenta un aumento del 400% (50 TMs). Para el caso de TMs con tráfico de voz ([Figura 33b](#)), al usar CDMA/GPS-DW se tiene un aumento del 39% con respecto al esquema CDGPS. Esta mejora es debida a que con el esquema CDMA/GPS-DW se asignan más equitativamente los códigos y no solamente toma en cuenta el tipo de servicio, sino que también toma en cuenta el ancho de banda requerido, el estado de la memoria temporal y el tiempo de vida que le queda al mensaje en cada MT. Además, el esquema CDMA/GPS-DW lleva a cabo una asignación dinámica del ancho de banda para cada TM.

Hemos visto cómo aumenta el número de TMs con tráfico de vídeo y voz usando el esquema propuesto CDMA/GPS-DW. Ahora veremos cómo el caudal eficaz del sistema varía cuando va aumentado la carga del canal ([ver Figura 34](#)).

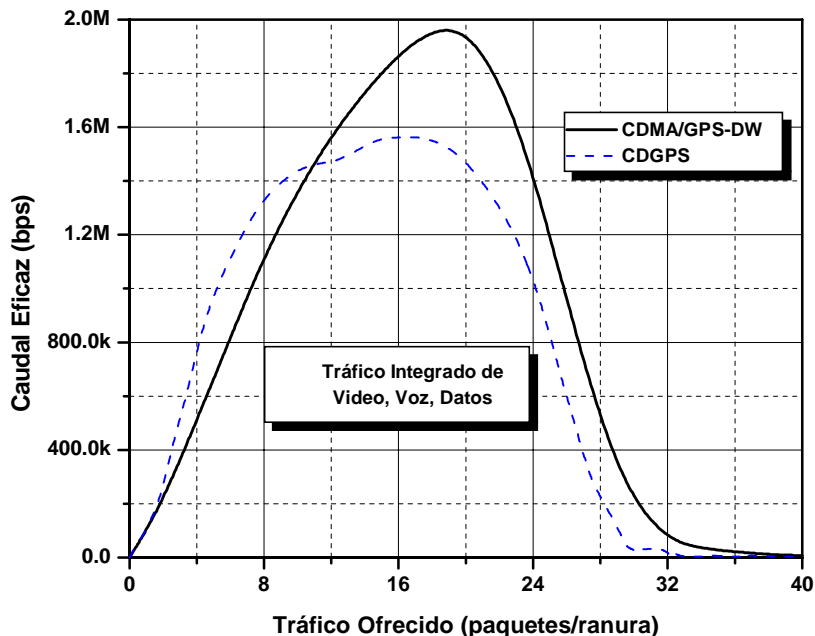


Figura 34. Comportamiento del caudal eficaz para los esquemas CDGPS y CDMA/GPS-DW en un ambiente de multimedia.

De la [Figura 34](#), observamos que al usar el esquema CDMA/GPS-DW se tiene un aumento del 26% en el manejo de la capacidad del canal con respecto a CDGPS, debido a que se aplicó una asignación óptima de los recursos. Tomando en cuenta que el número de códigos está limitado [[Covarrubias, 1999](#)] éstos se asignaron de manera equitativa, además de manejar dinámicamente los pesos. Hay que mencionar que no todos los TMs están activos, debido a que hemos considerado en la simulación que el número de TMs va aumentando gradualmente, para que de esta manera el tráfico ofrecido en el canal también aumente gradualmente. En la misma [Figura 34](#) se observa también que al llegar al máximo caudal eficaz no se mantiene este valor al aumentar la carga, debido a que en el proceso de contención, al aumentar el tráfico indica que aumenta el número de TMs y como el número de códigos es limitado se presentan colisiones al escoger el mismo código.

Hasta este punto podemos resumir que con el esquema CDMA/GPS-DW se pueden tener más TMs de vídeo y voz con respecto a CDGPS (ver [Figura 33](#)). Además, se hace un uso más equitativo de los recursos, con un aumento del 26% en la utilización de la capacidad del canal, determinado por medio del caudal eficaz (ver [Figura 34](#)).

El último parámetro a evaluar es el retardo, el cual es distinto para cada tipo servicio de acuerdo al estándar UMTS. En dicho estándar el retardo para vídeo debe ser menor de 150 mseg, para voz menor de 20 mseg y para datos de tipo WWW menor de 4 seg [[ETSI, 1997](#)].

Los resultados del retardo para vídeo, voz y datos bajo el esquema CDMA/GPS-DW se muestran en la [Figura 35](#), y con estos resultados se puede determinar si CDMA/GPS-DW cumple con los requerimientos de UMTS.



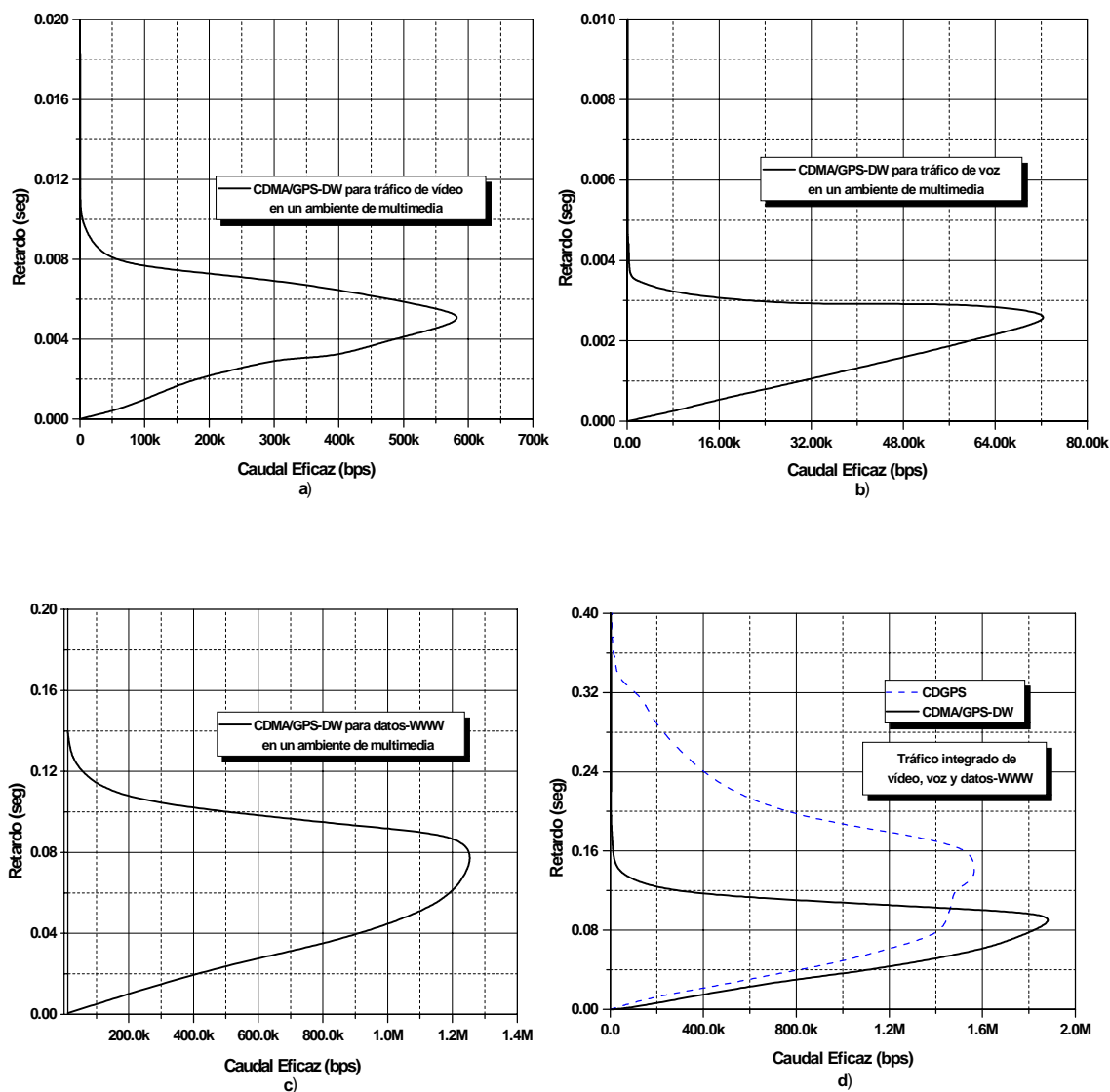


Figura 35. Comportamiento del retardo para el esquema CDMA/GPS-DW: a) vídeo, b) voz y c) datos-WWW. d) Retardo comparativo entre los esquemas CDMA/GPS-DW y CDGPS.

De la [Figura 35](#), observamos que los tres servicios tratados cumplen con los requerimientos de retardo. Para el tráfico de vídeo, se tiene un retardo de 5.5 mseg, en el máximo caudal eficaz ([Figura 35a](#)). Para el tráfico de voz, se obtiene un retardo de 2.5 mseg ([Figura 35b](#)) y para datos-WWW un retardo de 80 mseg ([Figura 35c](#)). En la [Figura 35d](#), se obtiene el retardo total para el esquema CDMA/GPS-DW, el cual es 30% menor, en el máximo caudal eficaz, con respecto a CDGPS. Esto es debido, a que los códigos se

asignan de una manera óptima y equitativa. Además, al tener un manejo dinámico de los pesos, se tiene un mejor manejo del ancho de banda, por lo tanto, se puede transmitir en un menor tiempo.

Podemos concluir que el esquema CDMA/GPS-DW con velocidad de canal variable, cumple con la asignación equitativa de los recursos y la calidad de QoS de acuerdo a la normativa UMTS.

## VII.4 CONCLUSIONES

Con este capítulo se ha cubierto en su totalidad el objetivo central de la tesis. Además, el estudio hecho para la técnica MAC (S-Aloha/DS-CDMA), ha sido reflejado en el algoritmo de asignación de recursos propuesto.

Por lo tanto, podemos concluir que se ha propuesto un nuevo esquema de asignación de recursos, CDMA/GPS-DW, para sistemas móviles 3G. Este esquema propuesto asigna equitativamente los recursos, maneja dinámicamente el ancho de banda, es adaptable al tráfico multimedia del canal y garantiza la calidad de servicio. Así mismo, se propuso un control para administrar las peticiones de los TMs, basado en la *SNR* requerida para garantizar QoS.

Nuestro esquema propuesto, CDMA/GPS-DW, ha sido comparado con CDGPS, debido a que ambos tienen las mismas características: están basados en múltiples velocidades y son aplicados a redes WCDMA. Los resultados indican que CDMA/GPS-DW mejora al reciente esquema de asignación de recursos CDGPS. Esta mejora está basada en la asignación dinámica de los pesos y al control de las peticiones de código. Al mismo tiempo, CDMA/GPS-DW cumple con los requerimientos de QoS, de acuerdo al estándar UMTS.



## VIII CONCLUSIONES

### VIII.1 CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Debido a la entrada inminente de los sistemas de tercera generación, en este trabajo de investigación se han aplicado una serie de estrategias para el estudio de nuevas alternativas en el diseño de estos sistemas. Estas estrategias fueron orientadas tanto para el protocolo de acceso al medio (MAC), como para los algoritmos de asignación de recursos. Las estrategias se fundamentaron en un estudio extenso sobre:

- una técnica de acceso que nos permita establecer cierto control en la petición de los recursos por parte de los TMs;
- técnicas para mejorar la fase de acceso del TM, en términos de mayor eficiencia y estabilidad;
- la técnica de acceso para un entorno de múltiples usuarios simultáneos y múltiples servicios. Además, la adaptabilidad de ésta a las condiciones del tráfico en el canal;
- la aplicación de un algoritmo para la asignación eficiente y equitativo de los recursos del sistema de comunicaciones móviles y
- cómo garantizar la calidad de servicio para tráfico multimedia (vídeo, voz y datos), de acuerdo al estándar UMTS.

Así, las principales conclusiones del presente trabajo de investigación, tomando en cuenta la estrategia de investigación desarrollada, pueden resumirse a continuación.

Con respecto a la técnica MAC, podemos decir que, dada la aleatoriedad en el acceso y/o petición de recursos de un TM, se utilizó S-Aloha en la fase de petición de canal, como un subconjunto de la técnica MAC. Después de haberse modelado matemáticamente S-Aloha (a través de cadenas de Markov), éste fue llevado a un ambiente de simulación. Los resultados de simulación nos indicaron las limitaciones que presentaban algunos parámetros de S-Aloha (baja eficiencia, inestabilidad y alto retardo); además, se determinaron las causas de estas restricciones.

En base a lo anterior, se investigaron algunas técnicas que mejoraran la respuesta de la fase de acceso. El primer parámetro a mejorar fue la baja eficiencia del sistema. Para esto, se modeló el sistema S-Aloha, a través de cadenas de Markov, considerando de manera conjunta el efecto del canal radio, la distribución de los TMs y el efecto captura. Los resultados obtenidos mostraron una mejor respuesta, en cuanto a mejores valores en el caudal eficaz (más del 70% de aumento en el caudal eficaz). El siguiente parámetro a mejorar estuvo relacionado con la estabilización en la respuesta de S-Aloha. Fue necesario entonces, considerar un control dinámico de las probabilidades de retransmisión. El algoritmo de retransmisión fue del tipo exponencial binario, el cual tomó en cuenta la información ternaria de retorno del canal. Los resultados obtenidos de este algoritmo fueron satisfactorios, ya que estabiliza la respuesta del sistema en todo el espectro de carga ofrecida al sistema. Otra mejora fue disminuir el retardo de propagación. Esto se logró al utilizar el algoritmo de retransmisión con información ternaria de retorno, ya que con esta información de retorno, el algoritmo resuelve más rápido las colisiones y por lo tanto, el TM transmite más pronto su paquete de información.

Además, los resultados de simulación han indicado también que las prestaciones del sistema del canal de petición (S-Aloha) no son sensibles al desvanecimiento Rayleigh. Por otra parte, se determinó que la estabilización es el elemento más sensible, porque se puede tener un sistema con una muy alta eficiencia, pero si es inestable, estamos sujetos a trabajar en una zona de bajo tráfico.

De esta manera, a partir de la estrategia de investigación seguida, se logró tener una fase de petición eficiente en términos de caudal eficaz, retardo y estabilidad.

Una vez optimizada la respuesta del sistema en la fase de petición de canal, se investigó una técnica de acceso para soportar múltiples usuarios simultáneos y múltiples servicios. Para esto, se desarrolló un modelo basado en cadenas de Markov para el estudio del protocolo de acceso múltiple S-Aloha, pero ahora dentro de la técnica DS-CDMA. El modelo fue diseñado a partir de diferenciar los procesos involucrados en el protocolo, tales como: el acceso a los códigos, las velocidades de transmisión, la ganancia de procesamiento, y las retransmisiones de paquetes afectadas por la interferencia multi-usuario (hipótesis Gaussiana), entre otros.

Los resultados de simulación del modelo S-Aloha/DS-CDMA indicaron baja eficiencia en la región de bajo tráfico, indicando que el sistema estaba limitado por la técnica de acceso. Para aumentar la eficiencia del sistema era necesario aumentar la velocidad de transmisión, por lo que se estudiaron tres alternativas: multi-modulación, multi-códigos y multi-ganancia de procesamiento, escogiendo ésta última por su flexibilidad para modificar la velocidad de transmisión. En esta alternativa, el control de la velocidad de transmisión se obtiene variando únicamente la ganancia de procesamiento sin modificar el ancho de banda de transmisión, pudiéndose así adecuar la velocidad empleada a las condiciones de carga del sistema. Los resultados de simulación con el control de multi-ganancia de procesamiento nos indicaron que el esquema S-Aloha/DS-CDMA fue adaptable a las condiciones del tráfico. De esta manera, el sistema ya no estaba limitado por la técnica de acceso (en la región de bajo tráfico), sino solo por la carga ofrecida al sistema.

Una vez que se resolvió la problemática relacionada al control de acceso (S-Aloha/DS-CDMA), el problema se centró en la fase de transmisión, ya que se debían atender de manera eficiente los requerimientos de servicio de los TMs para tráfico multimedia. A pesar de que existen en la literatura algoritmos de asignación de recursos para redes alámbricas, éstos no pueden aplicarse directamente a redes móviles debido a los

problemas relacionados al interfaz aire. Por lo tanto, se propuso un nuevo esquema de asignación de recursos, denominado CDMA/GPS-DW, para redes móviles de tercera generación (WCDMA). Nuestro esquema propuesto presenta las siguiente propiedades:

- Establece una asignación equitativa de los recursos.
- Es adaptable al tráfico.
- Maneja tráfico multimedia: vídeo, voz y datos.
- Maneja prioridades pre-definidas.
- Garantiza la calidad de servicio, de acuerdo al estándar UMTS.
- Ejecuta un control de las peticiones de código (control de admisión).
- Maneja múltiples velocidades.
- Incrementa la capacidad en el número de TMs.
- Maximiza el caudal eficaz.
- Realiza una asignación dinámica del ancho de banda.

Finalmente, se realizó una comparación de nuestro esquema de asignación de recursos propuesto (CDMA/GPS-DW) con el esquema CDGPS, considerando el mismo escenario de simulación. El resultado fue una respuesta superior medida en términos del caudal eficaz, retardo y paquetes descartados, para CDMA/GPS-DW.

En base a lo anterior, podemos concluir que nuestra nueva propuesta CDMA/GPS-DW para sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación, una vez validada mediante la comparación con otro sistema reciente (CDGPS), ha cumplido con las expectativas iniciales de obtener un sistema eficiente, tanto en sus aspectos de acceso al medio como de transmisión de paquetes a partir de un sistema eficiente de asignación de recursos.

## VIII.2 PUBLICACIONES COMO RESULTADO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Con respecto al análisis del modelado y simulación de la técnica de acceso múltiple, la adaptabilidad del tráfico en el canal, la asignación equitativa de los recursos y las garantías de calidad de servicio para un tráfico multimedia, los principales resultados fueron publicados en:

- Mendez, A., Covarrubias, D. y Brizuela, C. 2003. “Fair Scheduling with Dynamic Resource Allocation in CDMA/GPS Systems for IP-Multimedia Wireless Networks”. *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, aceptado para publicarse en el 2003.
- Mendez, A. y Covarrubias, D. 2003. “Admission Control and Scheduling Algorithm with QoS Guarantees for Multimedia Services on WCDMA Networks”. *WSEAS Transactions on Communications*, aceptado para publicarse en el 2003.

Los principales resultados, con relación a la problemática asociada a la fase de petición de canal (S-Aloha), como un subconjunto de la técnica MAC, así como las mejoras a la técnica de acceso, fueron publicados en

- Mendez, A., Covarrubias, D. y Vargas, C. 2002. “Modelling of the RACH Channel in a Real Environment for a High Efficiency and Stability on Wireless Communications”. En *Proc. 13<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications PIMRC'02*. 1171-1175 pp.
- Mendez, A. y Covarrubias, D. 2001. “Stability and Optimal Retransmission Control of S-Aloha as a RACH Channel on Wireless Networks”. En *Proc. 54<sup>th</sup> IEEE Vehicular Technology Conference- VTC'01*. 1368-1372 pp.

- Mendez, A. y Covarrubias, D. 2002. “Performance Evaluation of S-Aloha Stability as a Channel RACH in a Mobile Cellular Environment”. En *Memorias del 17<sup>th</sup> Congreso de la Sociedad Mexicana de Instrumentación SOMI-XVII* (disponible en CD).
- Mendez, A. y Covarrubias, D. 2001. “Análisis de Prestaciones del Protocolo PRMA en Comunicaciones Móviles Celulares considerando el Proceso de Traspaso (‘Hand-off’)”. En *Memorias del X Congreso Internacional de Electrónica, Comunicaciones y Computadoras 2001-CONIELECOM’01*. 6-10 pp.

### VIII.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Como un resultado de los estudios realizados en esta tesis, ha surgido un conjunto de futuros trabajos que pueden resultar de interés para llevarse a cabo. Estos se mencionan a continuación:

1. El análisis hecho para la técnica MAC S-Aloha/DS-SS fue considerando un control de potencia perfecto, pero se puede usar un control de potencia para compensar los efectos del canal radio. Además, será de interés emplear un control de potencia para proveer QoS de tráfico multimedia en WCDMA. Para lograr esto, es necesario modificar el modelo del esquema de multi-ganancia de procesamiento, para que se pueda obtener una adaptabilidad del tráfico en el canal.
2. Con respecto al algoritmo de asignación de recursos propuesto, CDMA/GPS-DW, este algoritmo debe modificarse cuando se requiera usar la estrategia de pre-compra (*pre-emption*). La estrategia de pre-compra se emplea cuando no hay recursos disponibles y se requiere asignar un recurso en un instante dado. Por lo tanto, la EB quita un recurso a un TM de acuerdo a una prioridad de servicio. Una aplicación de esto, es cuando se presenta un traspaso de un TM.
3. Considerando que en el Grupo de Comunicaciones Inalámbricas (CICESE-GCI), una línea de investigación es Antenas Inteligentes, puede aplicarse en esa área el control de



multi-ganancia de procesado para tener una adaptación del tráfico bajo el esquema de CDMA/SDMA<sup>9</sup>.

4. Bajo la misma tendencia del punto anterior, sería conveniente aplicar el esquema de asignación de recursos propuesto en el protocolo CDMA/SDMA.

---

<sup>9</sup> Acceso Múltiple por División de Código/ Acceso Múltiple por División Espacial.



## LITERATURA CITADA

Agnētis, A., Brogi, G., Ciaschetti, Detti, P. y Giambene, G. 2003. "Optimal Packet Scheduling in UTRA-TDD". *IEEE Communications Letters*. 7(3): 112-114.

Alonso, L. 2001. "Técnicas de Acceso y Gestión de Recursos para Garantizar Calidad de Servicio en Sistemas de Comunicaciones Móviles basados en CDMA". Tesis de Doctorado. UPC.

Andreadis, A., Fantacci, R., Giambene, G. y Petiti, F. 2002. "An Efficient Uplink and Downlink Resource Sharing Scheme for Wireless Multimedia Systems". *IEICE Transactions on Communications*. 85(8): 1512-1524 pp.

Babich, F. y Lombardi, G. 2000. "A Markov Model for the Mobile Propagation Channel". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 49(1): 63-73 pp.

Bertsekas, D. y Gallager, R. 1992. "Data Networks", Prentice-Hall, Segunda Edición, New Jersey. 556 pp.

Bing, B. 1998. "On the Stability of the Randomized Slotted ALOHA Protocol". *Proc. IEEE Int. Symp. Inform. Theory*. 223 p.

Bing, B. 2000. "Stabilization of the Randomized Slotted ALOHA Protocol Without the Use of Channel Feedback Information". *IEEE Communications Letters*. 4(4): 249-251 pp.

- Bing, B. y Subramanian, R. 1999 “Enhanced Reserved Polling Multiaccess Technique for Multimedia Personal Communication Systems”, *ACM/Batlzer Journal on Wireless Networks*. 5(3): 221-230 pp.
- Bolch, G., Geiner, S., De Meer, H. y Trivedi, K. S. 1998. “Queueing Networks and Markov Chains: Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications”. John Wiley & Sons. Primera Edición. New York. 726 pp.
- Bottcher, A. y Dippold, M. 1993. “The Capture Effect in Multiaccess Communications-the Rayleigh and Landmobile Satellite Channels”. *IEEE Transactions on Communications*. 41(9): 1364-1372 pp.
- Cao, Q. 1998. “Medium Access Control (MAC) for Wide-Band CDMA Systems with Optimal Throughput”. *Proc. 48<sup>th</sup> IEEE VTC'98*. 988-992 pp.
- Carleial, A. y Hellman, M. 1975. “Bistable behavior of ALOHA-type systems”, *IEEE Transactions on Communications*. 23(4): 401-410 pp.
- Castro, J. P. 2001. “The UMTS Network and Radio Access Technology: Air Interface Techniques for Future Mobile Systems”. John Wiley & Sons. Primera Edición. Chichester. 354 pp.
- Chaudhury, P., Mohr, W. y Onoe, S. 1999. “The 3GPP Proposal for IMT-2000”. *IEEE Communications Magazine*. 37(12): 72-81 pp.
- COFETEL-Comisión Federal de Telecomunicaciones, 2003. “Estadísticas de Telecomunicaciones”. México. Disponible en: <http://www.cft.gob.mx/>.

Covarrubias, D. 1999. "Técnicas de Asignación Dinámica y Estabilización de MAC Aplicables a Sistemas Móviles de Tercera Generación". Tesis de Doctorado. UPC.

Covarrubias-1, D., Ruiz, S., Huguet, J. y Olmos, J. 1998. "Spatial Distribution Analysis with Capture Effect of a Mobile S-Aloha Network". *Proc. IEEE PIMRC'98*. 1116-1120 pp.

Covarrubias-2, D., Ruiz, S., Huguet J., y Olmos, J. 1998. "Performance Analysis of Slotted-ALOHA Considering Different Retransmission Algorithms for Wireless Networks under Real Channel Models". *Proc. IEEE ICT'98*. 285-289 pp.

Covarrubias-3, D., Ruiz, S., Gómez, P. y Olmos. J. 1998. "An efficient Adaptive Coding Scheme for Data Transmission over a Fading and Nonstationary Mobile Radio Channel". *Proc. IEEE 3<sup>rd</sup> MDMC'98*. 168-173 pp.

Davis, D. H. y Gronemeyer, S. A. 1980. "Performance of Slotted ALOHA Random Access with Delay Capture and Randomized Time of Arrival". *IEEE Transactions on Communications*. 28(5): 703-710 pp.

Dinan, E. H. y Jabbari, B. 1998. "Spreading Codes for Direct Sequence CDMA and Wideband CDMA Cellular Networks". *IEEE Communications Magazine*. 36(9): 48-54 pp.

ETSI, 1997. "UMTS Selection Procedure for the Choice of Radio Transmission Technologies of the UMTS (UMTS 30.03 version 3.1.0)", Reporte Técnico ETSI TR 101, *European Telecommunications Standard Institute*.

Fattah, H. y Leung, C. 2002. "An Overview Scheduling Algorithms in Wireless Multimedia Networks". *IEEE Wireless Communications*. 9(5): 76-83 pp.

Fitzek, F., Kopsel, A., Wolisz, A. Krishnam, M y Reisslein, M. 2002. “Providing Application-Level QoS in 3G/4G Wireless Systems: A Comprehensive Framework Based on Multirate CDMA”. *IEEE Wireless Communications*. 9(2): 42-47 pp.

Fukuda, A. y Tasaka, S. 1983. “The Equilibrium Point Analysis – a Unified Analytic Tool for Packet Broadcast Networks”, *Proc. IEEE GLOBECOM'83*. 1133-1140 pp.

Goodman, D. J. y Saleh, A.A.M. 1987. “The Near/Far Effect in Local ALOHA Radio Communications”. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 36(1): 19-27 pp.

Habbab, I. M. I., Kavehrad, M. y Sundberg, C. E. W. 1998. “ALOHA with Capture Over Slow and Fast Fading Radio Chnnels with Coding and Diversity”. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 7(1): 79-88 pp.

Hajek, B. y Van Loon, T. 1982. “Decentralized Dynamic Control of a Multiple Access Broadcast Channel”. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 27(3). 559-569 pp.

Hernandez, A., Valdovinos, A. y Casadevall, F. 2002. “Multimedia Traffic Management for Packetized Uplink Transmission in WCDMA UMTS”. *Proc. European Wireless 2002*. Disponible en: <http://www.ing.unipi.it/ew2002/>.

Hernando, J. M. y Perez, F. 1999. “Introduction to Mobile Communications Enigeering”, Artech House Publishers, Primera Edición, Boston. 535 pp.

Hoang, D-H. y Reschke, D. 2002. “A Scheduling Scheme for QoS Supports in the Heterogeneous Wireless Network Environment”. *Proc. Multimediale Informations- und Kommunikations Systeme '02*. Disponible en: <http://www.netobjectdays.org/node02/de/Conf/publish/talks.html>

Huang, D. y Shi, J. J. 2002. "Radio Resource Management for Quality of Service in Third Generation Mobile Communications". *Proc. 55<sup>th</sup> IEEE VTC'02*. 1724-1727 pp.

Huang, D. y Shi, J. J. 2001. "Quality of Service Scheduling in Wireless Multimedia Communications". *Proc. 53<sup>th</sup> IEEE VTC'01*. 2229-2233 pp.

I, C-L. y Sabnani, K. K. 1995. "Variable Spreading Gain CDMA with Adaptive Control for True Packet Switching Wireless Network". *Proc. IEEE ICC'95*. 725-730 pp.

I, C-L., Pollini, G. P., Ozarow, L. y Gitlin, R. D. 1995. "Performance of Multi-Code CDMA Wireless Personal Communications Networks". *Proc. 45<sup>th</sup> IEEE VTC'95*. 907-911 pp.

Internet 1. 2003. Disponible:

<http://www.telefonos-moviles.com/news/archive.asp?y=2003&m=3&t=>

Internet 2, 2003. Disponible:

[http://www.3gnewsroom.com/3g\\_news/index.shtml](http://www.3gnewsroom.com/3g_news/index.shtml)

Internet 3. 2003. Disponible:

<http://www.telefonos-moviles.com/news/item.asp?ID=2047>

Jeon, H. G., Kwon, S. y Kang C. 1998. "Reverse Link Capacity Analysis of a DS-CDMA Cellular System with Mixed Rate Traffic". *IEICE Transactions on Communications*. 81(6): 1280-1282 pp.

Jeong, D. y Jeong, W. 1995. "Performance of an Exponential Backoff Scheme for Slotted-ALOHA Protocol in Local Wireless Environment". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 44(3): 470-479 pp.

Jeong, M., Morikawa, H. y Aoyama, T. 2001. "A Fair Scheduling Algorithm for Wireless Packet Networks". *IEICE Transactions on Fundamentals*. 84(7): 1624-1635 pp.

Jeong, M., Yoshimura, T., Morikawa, H. y Aoyama, T. 2002. "A Minimum Bandwidth Guaranteed Service Model and Its Implementation on Wireless Packet Scheduler". *IEICE Transactions on Fundamentals*. 85(7): 1463-1471 pp.

Kang, H., Kim, D., Lee, C. y Kim, K. 2000. "A Throughput-Efficient Code Assignment Scheme for an Integrated Voice/Data Multi-Code CDMA System". *Proc. 51<sup>st</sup> IEEE VTC'00*. 1494-1497 pp.

Karol, M. J., Liu, Z. y Eng, K. Y. 1995. "Distributed-Queueing Request Update Multiple Access (DQRUMA) for Wireless Packet (ATM) Networks". *Proc. ICC'95*. 1224-1231 pp.

Kim, D. I, Hossain, E. y Bhargava, V. K. 2001. "Integrated Error Control in Variable Spreading Gain WCDMA Systems" *Proc. IEEE ICC'2001*. 1362-1366 pp.

Kim, J. B., Honig, M. L. y Jordan, S. 2001. "Dynamic Resource Allocation for Integrated Voice and Data Traffic in DS-CDMA". *Proc. 54<sup>th</sup> IEEE VTC'01*. 42-46 pp.

Kim, J. H. y Lee, J. K. 1998. "Performance Analysis of Wireless MAC Protocols with Rayleigh, Log-Normal Shadowing and Capture Effects" *IEICE Transactions on Communications*. 81(1): 73-81 pp.

Kleinrock-1, L. 1975. "Queueing Systems Volume I: Theory". John Wiley & Sons, Primera Edición. New York. 417 pp.

Kleinrock-2, L. y Lam, S. 1975. "Packet Switch in a Multiaccess Broadcast Channel: Performance Evaluation". *IEEE Transactions on Communications*. 23(4): 410-423 pp.

Kumaran, K. y Qian, L. 2003. "Uplink Scheduling in CDMA Packet-Data Systems". *Proc. IEEE INFOCOM'03*. Disponible en: <http://www.ieee-infocom.org/2003/>.

Kwak, J-Y., Nam, J-S. y Kim, D-H. 2002. "A Modified Dynamic Weighted Round Robin Cell Scheduling Algorithm". *ETRI Journal*. 24(5): 360-372 pp.

Lau, C. y Leung, C. 1992. "Capture Models for Mobile Packet Radio Networks". *IEEE Transaction on Communications*. 40(5): 917-925 pp.

Lee, S. J., Kim, T. S. y Sung D. K. 2001. "Bit-Error Probabilities of Multicode Direct-Sequence Spread -Spectrum Multiple-Access Systems". *IEEE Transactions on Communications*. 49(1): 31-34 pp.

Liberti, J. C. y Rappaport, T. C. 1999. "Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications". Prentice Hall. Primera Edición. New Jersey. 376 pp.

Lindemann, C., Lohmann, M. y Thümmler, A. 2002. "Adaptive Performance Management for Universal Mobile Telecommunications System Networks". *Computer Networks*. 38(4): 477-496 pp.

Linnartz, J. P. 1993. "Narrowband Land-Mobile Radio Networks". Artech House. Primera Edición. Boston. 345 pp.

Linnartz, J. P. y Prasad, R. 1989. "Near-Effect on Slotted Aloha Channel with Shadowing and Capture". *Proc. IEEE VTC'89*. 809-813 pp.

Liu, Z. y El Zarki, M. 1994. "Performance Analysis of DS-CDMA with Slotted Aloha Random Access for Packet PCNs". *Proc. 5<sup>th</sup> IEEE PIMRC'94*. 1034-1039 pp.



Liu, Z. y El Zarki, M. 1995. "Performance Analysis of DS-CDMA with Slotted ALOHA Random Access for Packet PCNs". *Wireless Networks*. 1(1): 1-16 pp.

Lo, F. L., Ng. T. S. y Yuk, T. I. 1996. "Performance Analysis of a Slotted CDMA ALOHA Network". *International Journal of Wireless Networks*. 3(4): 195-202 pp.

Lu, S, Bhargavan, V. y Srinikant, R. 1997. "Fair Scheduling in Wireless Packet Networks". *Proc. SIGCOMM'97*. 67-74 pp

Lu, S., Nandagopal, T. y Bhargavan, V. 1998. "A Wireless Fair Service Algorithm for Packet Cellular Networks". *Proc. MOBICOM'98*. 10-20 pp.

Lu, S, Bhargavan, V. y Srikant, R. 1999. "Fair Scheduling in Wireless Packet Networks". *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 7(4): 473-489 pp.

Lyu, D., Park, Y., Song, I y Kim, H-M. 1997. "Performance Evaluation of a Variable Processing Gain DS/CDMA System" *IEICE Transactions on Fundamentals*. 80(2): 393-399 pp.

Mendez, A. y Covarrubias, D. 2001. "Stability and Optimal Retransmission Control of S-Aloha as a RACH Channel on Wireless Networks". *Proc. 54<sup>th</sup> IEEE VTC'01*. 1368-1372 pp.

Mendez, A., Covarrubias, D. y Vargas, C. 2002. "Modelling of the RACH Channel in a Real Environment for a High Efficiency and Stability on Wireless Communications". *Proc. 13<sup>th</sup> IEEE PIMRC'02*. 1171-1175 pp.

Mendez, A. Covarrubias, D. y Brizuela. 2003. "Fair Scheduling with Dynamic Resource Allocation in CDMA/GPS Systems for IP-Multimedia Wireless Networks". *Journal of Circuits, Systems, and Computers*. Aceptada para publicarse en el 2003.

Mendez, A. y Covarrubias, D. 2003. "Admission Control and Scheduling Algorithm with QoS Guarantees for Multimedia Services on WCDMA Networks". *WSEAS Transactions on Communications*. Aceptada para publicarse en el 2003.

Naragahi-Pour, M. y Liu, H. 2000. "Integrated Voice-Data Transmission in CDMA Packet PCN's". *Proc. IEEE ICC'00*. 1085-1089 pp.

Ng, T.S.E., Stoica, I. y Zhang, H. 1998. "Packet Fair Queueing Algorithms for Wireless Networks with Location-Dependent Errors". *Proc. INFOCOM'98*. 1103-1111 pp.

Oh, S-J. y Wasserman, K. M. 1999. "Dynamic Spreading Gain Control in Multiservice CDMA Networks". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 17(5): 918-927 pp.

Ojanpera, T. y Prasad. R. 1998. "Wideband CDMA for Third Generation Mobile Communications". Artech House. Primera Edición. Portland. 468 pp.

Onozato, Y., Liu, J. y Noguchi, S. 1989. "Stability of Slotted ALOHA System with Capture Effect", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 38(1): 31-36 pp.

Ottosson, T. y Svensson, A. 1995. "Multi-Rate Schemes in DS/CDMA Systems". *Proc. 45<sup>th</sup> IEEE VTC'95*. 1006-1010 pp.

Ottosson, T. y Svensson, A. 1998. "On Schemes for Multirate Support in DS-CDMA Systems". *Wireless Personal Communications*. 6(3): 265-287 pp.

Padgett, J. E., Gunther, C. G. y Hattori, T. 1995. "Overview of Wireless Personal Communications". *IEEE Communications Magazine*. 33(1): 28-41 pp.

Parekh, A. K. y Gallager, R. G. 1993. "A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks: the Single-Node Case". *IEEE/ACM Transaction on Networking*. 1(3): 344-357 pp.

Park, J-Y., Kim, D-K. y Sung, D-K. 2000. "An Enhanced DQRUMA/MC-CDMA Protocol for Wireless Packet Networks". *IEICE Transactions on Communications*. 83(7): 1567-1571 pp.

Prasad, R., Mohr, W. y Konhauser, W. 2000. "Third Generation Mobile Communication Systems". Artech House Publishers. Primera Edición. Boston. 386 pp.

Pursley, M. B. 1977. "Performance Evaluation for Phase-Coded Spread-Spectrum Multiple-Access Communications – Part I: System Analysis". *IEEE Transactions on Communications*. 25(8): 795-799 pp.

Ramakrishna, S. y Holtzman, J. K. 1998. "A Comparison Between Single Code and Multiple Code Transmission Schemes in a CDMA System". *Proc. 48<sup>th</sup> IEEE VTC'98*. 791-795 pp.

Rappaport, T. S. 2001. "Wireless Communications: Principles and Practice". Prentice Hall. Segunda Edición. New Jersey. 736 pp.

Rivest, R. 1987. "Network Control by Bayesian Broadcast", *IEEE Transactions on Information Theory*. 33(3): 323-328 pp.

Rom, R. y Sodi, M. 1990. "Multiple Access Protocol: Performance and Analysis". Springer-Verlag, Primera Edición. New York. 177 pp.

Sallent, O. y Agustí, R. 1998. "A Proposal for an Adaptive S-ALOHA Access System for a Mobile CDMA Environment". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 47(3): 977-986 pp.

Sallent, O. 1999. "Comunicaciones Móviles: Sistemas 3G". *Mundo Electrónico*. 304(11): 46-50 pp.

Sallent, O. y Agustí, R. 2000. "Adaptive S-ALOHA CDMA as an Alternative Way of Integrating Services in Mobile Environments". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 49(3): 936-947 pp.

Sandouk, A., Yamazato, T., Katayama, M. y Ogawa, A. 1999. "An Integrated Voice/Data CDMA Packet Communications with Multi-Code CDMA Scheme". *IEICE Transactions on Fundamentals*. 82(10): 2105-2113 pp.

Sandouk, A., Yamazato, T., Katayama, M. y Ogawa, A. 2000. "An Access Control Protocol for a Heterogeneous Traffic with a Multi-Code CDMA Scheme". *IEICE Transactions on Fundamentals*. 83(11): 2085-2092 pp.

Sant, J. y Sharma, V. 2000. "Performance Analysis of a Slotted-ALOHA Protocol on a Capture Channel with Fading". *Queueing Systems –Theory and Applications*. 34(1-4): 1-35 pp.

Shiokawa, S. y Tasaka, S. 2001. "Bandwidth Allocation Considering Priorities Among Multimedia Components in Mobile Networks". *IEICE Transactions on Communications*. 84(5): 1344-1355 pp.

Sheikh, A., Yu-Dong, Y. y Wu, W. 1990. "The Aloha Systems in Shadowed Mobile Radio Channels with Slow or Fast Fading". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 39(4): 289-298 pp.

Steele, R. 1994. "The Evolution of Personal Communications". *IEEE Personal Communications*. 1(2): 6-11 pp.

Tasaka, S. 1983. "Stability and Performance of the R-ALOHA Packet Broadcast System", *IEEE Transactions on Computers*. 32(8): 717-726 pp.

Tasaka, S. 1986. "Performance Analysis of Multiple Access Protocols". MIT Press. Primera Edición. Cambridge. 263 pp.

Taylor, H. M. y Karlin, S. 1998. "*An Introduction to Stochastic Modeling*". Academic Press Inc. Tercera Edición. New York. 656 pp.

Thomopoulos, S.C.A.1988. "A Simple and Versatile Decentralized Control for Slotted ALOHA, Reservation ALOHA, and Local Area Networks". *IEEE Transactions on Communications*. 36(6): 662-674 pp.

UMTS. 1998. "Minimum Spectrum Demand per Public Terrestrial UMTS Operators in the initial phase", Reporte No.5 de UMTS Forum. 66 pp.

UMTS-1. 1999. "Report on Candidate Extension Bands for UMTS/IMT-2000 Terrestrial Component". Reporte No.7 de UMTS Forum. 46 pp.

UMTS-2. 1999. "UMTS/IMT-2000 Spectrum", Reporte No. 6 de UMTS Forum. 114 pp.

UMTS. 2002. "Long Term Potential Remains High for 3G Mobile Data Services". Reporte No. 18 de UMTS Forum. 12 pp.

- Vannithamby, R. y Sousa, E. S. 2000. "Performance of Multi-Rate Data Traffic Using Variable Spreading Gain in the Reverse Link Under Wideband CDMA". *Proc. 51<sup>st</sup> IEEE VTC'00*. 1155-1159 pp.
- Wong, V. y Leung, C. 1992. "Capture Probability in a Mobile Packet Radio System". *IEEE Transaction on Communications*. 40(10): 1577-1580 pp.
- Wu, J. y Cono, R. 1996. "A Wireless Multi-Media CDMA System Based on Processing Gain Control". *IEICE Transactions on Fundamentals*. 79(12): 2018-2027 pp.
- Xie, P., Gunawan, E., Soong, B. H. y Soh, C. B. 2000. "A Protocol for Multimedia CDMA Personal Communications Networks". *Wireless Personal Communications*. 14(3): 275-301 pp.
- Xu, L., Shen, X. y Mark, J. W. 2002. "Dynamic Bandwidth Allocation with Fair Scheduling for WCDMA Systems". *IEEE Wireless Communications*. 9(2): 26-32 pp.
- Yang, S. C. 1998. "CDMA RF System Engineering". Artech House. Primera Edición. Norwood. 280 pp.
- Zhan, H. 1995. "Service Disciplines for Guaranteed Performance Service in Packet-switching Networks". *Proceedings of the IEEE*. 85(10): 1374-1396.
- Zhou, H. y Deng, R. 1998. "Capture Model for Mobile Radio Slotted ALOHA Systems". *IEE Proceedings on Communications*. 145(2): 91-97 pp.
- Zorzi, M. y Rao, R. 1994. "Capture and Retransmission Control in Mobile Radio", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 12(8): 1289-1298 pp.



## APÉNDICE A. PROBABILIDAD DE TRANSICIÓN DE UNA ETAPA

En este apartado se deriva la probabilidad de transición de una etapa de la cadena de Markov en tiempo discreto. Para este análisis, se hace la siguiente consideración,

Para  $K < N$ :

$$\sum_{n=0}^N \sum_{s=0}^{\min(K,n)} \Pr(N_k^{(S)} = s, N_k^{(T)} = n | N_k^{(B)} = i) = 1, \quad (\text{A.1})$$

la probabilidad de transición de una etapa

$$p_{ij} = \Pr(N_{k+1}^{(B)} = j | N_k^{(B)} = i), \quad 0 \leq i, j \leq N, \quad (\text{A.2})$$

puede ser expresada como

$$p_{ij} \sum_{n=0}^N \sum_{s=0}^{\min(K,n)} \Pr(N_{k+1}^{(B)} = j, N_k^{(S)} = s, N_k^{(T)} = n | N_k^{(B)} = i). \quad (\text{A.3})$$

De las propias definiciones de los parámetros, pueden establecerse las siguientes relaciones:

$$N = N_k^{(I)} + N_k^{(B)}, \quad (\text{A.4})$$

$$N_k^{(T)} = N_k^{(N)} + N_k^{(R)}, \quad (\text{A.5})$$

$$N_{k+1}^{(B)} - N_k^{(B)} = N_k^{(N)} - N_k^{(S)}. \quad (\text{A.6})$$

Esta última expresión refleja que el incremento del número de TMs en modo de retransmisión está dado por la diferencia entre el número de TMs que transmiten incorrectamente en la  $k$ -ésima ranura de tiempo y se encontraban en modo vacío al inicio del mismo y el número de TMs que se encontraban en modo bloqueo al inicio de la ranura de tiempo y logran una transmisión con éxito en la  $k$ -ésima ranura de tiempo. Es decir,

$$\left. \begin{array}{l} N_k^{(S)} = s \\ N_k^{(B)} = i \\ N_{k+1}^{(B)} = j \end{array} \right\} \Rightarrow N_k^{(N)} = j - i + s . \quad (\text{A.7})$$

Considerando las relaciones anteriores se tiene que

$$\begin{aligned} p_{ij} &= \sum_n \sum_{s=0}^{\min(K,n)} \Pr(N_k^{(N)} = j - i + s, N_k^{(S)} = s, N_k^{(T)} = n | N_k^{(B)} = i) , \\ p_{ij} &= \sum_n \sum_{s=0}^{\min(K,n)} \Pr(N_k^{(S)} = s | N_k^{(T)} = n, N_k^{(N)} = j - i + s, N_k^{(B)} = i) \\ &\times \Pr(N_k^{(T)} = n | N_k^{(N)} = j - i + s, N_k^{(B)} = i) \Pr(N_k^{(N)} = j - i + s | N_k^{(B)} = i) . \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Manipulando las relaciones existentes entre los distintos parámetros y haciendo de nuevo uso de la probabilidad condicionada, se llega a

$$\begin{aligned} p_{ij} &= \sum_n \sum_{s=0}^{\min(K,n)} \Pr(N_k^{(R)} = n - j + i - s | N_k^{(B)} = i, N_k^{(B)} = i) \\ &\times \Pr(N_k^{(N)} = j - i + s | N_k^{(T)} = n) \Pr(N_k^{(S)} = s | N_k^{(T)} = n) \\ &= \sum_{n=0}^N \sum_{s=0}^{\min(K,n)} \binom{i}{n - j + i - s} p_R^{n - j + i - s} (1 - p_R)^{j - n + s} \binom{N - i}{j - i + s} p_o^{j - i + s} (1 - p_o)^{N - j - s} \\ &\times \Pr(N_k^{(S)} = s | N_k^{(T)} = n) , \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

donde:

$$\Pr(N_k^{(R)} = n - j + i - s | N_k^{(B)} = i) = \binom{i}{n - j + i - s} p_R^{n - j + i - s} (1 - p_R)^{j - n + s} , \text{ y}$$



$$\Pr\left(N_k^{(N)} = j - i + s \mid N_k^{(I)} = N - i\right) = \binom{N - i}{j - i + s} p_o^{j - i + s} (1 - p_o)^{N - j - s} .$$

Para el caso  $K \geq N$ :

La condición inicial cambia debido a que cuando se tiene más códigos ( $K$ ) que número de TMs en el sistema ( $N$ ), el máximo de paquetes que pueden ser recibidos correctamente es  $n$ , por lo que queda:

$$\sum_{n=0}^N \sum_{s=0}^n \Pr\left(N_k^{(S)} = s, N_k^{(T)} = n \mid N_k^{(B)} = i\right) = 1, \quad (\text{A.10})$$

$$\begin{aligned} p_{ij} &= \sum_n \sum_{s=0}^n \Pr\left(N_k^{(R)} = n - j + i - s \mid N_k^{(B)} = i, N_k^{(B)} = i\right) \\ &\quad \times \Pr\left(N_k^{(N)} = j - i + s \mid N_k^{(I)} = N - i\right) \Pr\left(N_k^{(S)} = s \mid N_k^{(T)} = n\right) \\ &= \sum_{n=0}^N \sum_{s=0}^n \binom{i}{n - j + i - s} p_R^{n - j + i - s} (1 - p_R)^{j - n + s} \binom{N - i}{j - i + s} p_o^{j - i + s} (1 - p_o)^{N - j - s} \\ &\quad \times \Pr\left(N_k^{(S)} = s \mid N_k^{(T)} = n\right). \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$



## APÉNDICE B. DISTRIBUCIÓN CONDICIONAL DE PAQUETES ADQUIRIDOS

Se trata de determinar la probabilidad de que cuando  $n$  TMs transmiten un paquete en un sistema en el cual hay menos códigos que TMs y los TMs escogen aleatoriamente uno cualquiera de los  $K$  códigos de que se dispone, haya exactamente  $a$  de ellos que escojan un código que no ha sido escogido por ningún otro TM.

Este problema se puede reformular de la siguiente manera: dadas  $K$  cajas distinguibles (que representan los códigos) y  $n$  bolas distinguibles (que representan los TMs), determinar la probabilidad de que  $a$  de las  $K$  cajas contengan exactamente una bola (el hecho de que la bola  $i$ ,  $i=1, 2, \dots, n$  vaya a parar a la caja  $j$ ,  $j=1, 2, \dots, K$  representa que el TM  $i$ -ésimo escoge el código  $j$ -ésimo). El hecho de que sólo haya una bola en la caja significa que ningún otro TM ha escogido ese código.

El problema puede solucionarse de la siguiente manera: en primer lugar fijamos  $a$  de las  $K$  cajas, en las que ponemos una bola en cada una. El número de distribuciones en el que se puede realizar este experimento es

$$\binom{K}{a} \binom{n}{a} a! , \quad (\text{B.1})$$

donde el primer término representa las maneras en que se pueden escoger  $K$  cajas de  $a$  en  $a$ , el segundo son las configuraciones en que se pueden escoger  $n$  bolas de  $a$  en  $a$ , y finalmente debe considerarse todas las posibilidades de colocar las  $a$  bolas escogidas en las  $a$  cajas escogidas (permutaciones sin repetición de  $a$  elementos).

Llegados a este punto quedan  $(K-a)$  cajas y  $(n-a)$  bolas. Se trata de determinar el número de distribuciones en las que las  $(n-a)$  bolas se sitúan en las  $(K-a)$  cajas de forma que ninguna caja tenga exactamente una bola (las  $(K-a)$  cajas pueden contener o ninguna bola o más de una bola). A este subconjunto de distribuciones le llamaremos  $|B|$ . Veremos en primer lugar el número total de distribuciones en las que se reparten  $(n-a)$  bolas en  $(K-a)$  cajas, y restamos a continuación aquellas en las que aparezca alguna caja con exactamente una bola. Distribuciones de  $(n-a)$  bolas en  $(K-a)$  cajas hay  $(K-a)^{(n-a)}$ .

Denotemos por  $|A_i|$   $i=1, 2, \dots, (K-a)$  el número de distribuciones en los que la caja  $i$ -ésima queda exactamente con una bola. Entonces

$$|A_i| = (n-a)(K-a-1)^{(n-a-1)} = \frac{(n-a)!}{(n-a-1)!} (K-a-1)^{(n-a-1)}, \quad (\text{B.2})$$

esto es, fijamos una bola determinada en la caja  $i$ -ésima y repartimos el resto de bolas  $(n-a-1)$  en el resto de cajas  $(K-a-1)$ . La bola fijada en la caja  $i$ -ésima puede ser cualquiera de las  $(n-a)$  que tenemos, por lo que de hecho tenemos  $(n-a)$  veces el número de distribuciones anterior.

Denotemos por  $|A_i \cap A_j|$  el número de distribuciones en que tanto la caja  $i$ -ésima como la  $j$ -ésima quedan con exactamente una bola. Entonces

$$|A_i \cap A_j| = \frac{(n-a)!}{(n-a-2)!} (K-a-2)^{(n-a-2)}, \quad (\text{B.3})$$

esto es, fijamos una bola en una caja  $i$ -ésima y otra bola en la caja  $j$ -ésima. Repartimos las  $(n-a-2)$  bolas restantes en las  $(K-a-2)$  cajas restantes, lo cual puede hacerse de  $(K-a-2)^{(n-a-2)}$  maneras distintas. Todas estas distribuciones se darán para cualquier par de las  $(n-a)$  bolas que se hayan colocado en las cajas  $i$ -ésima y  $j$ -ésima. En concreto, el número de pares de bolas que pueden colocarse en las cajas  $i$ -ésima y  $j$ -ésima son  $(n-a)(n-a-1)$

(cualquiera de las  $(n-a)$  bolas puede ir en una caja y cualquiera de las  $(n-a-1)$  restantes en la otra). Además, deberá tenerse en cuenta posteriormente que este número de distribuciones se da para cualquier par de cajas  $i$  y  $j$  que se consideren. Así sucesivamente hasta llegar al último caso:

$$|B| = (K-a)^{(n-a)} - \sum_{i=1}^{(K-a)} |A_i| + \sum_{i<j<k} |A_i \cap A_j \cap A_k| \dots \quad (\text{B.4})$$

donde debe hacerse notar que las sumatorias no dependen del subíndice, de manera que se obtiene la expresión en cada caso multiplicada por el número de elementos que contiene la sumatoria, que no es más que las maneras en que pueden escogerse  $(K-a)$  cajas de una en una, de dos en dos, etc, respectivamente. Así pues

$$|B| = (K-a)^{(n-a)} - \binom{n-a}{1} |A_i| + \binom{n-a}{2} |A_i \cap A_j| - \binom{n-a}{3} |A_i \cap A_j \cap A_k| \dots \quad (\text{B.5})$$

Por lo tanto puede ya escribirse

$$Pr(N^{(A)} = a | N^{(T)} = n) = \frac{\binom{K}{a} \binom{n}{a} a! \left( (K-a)^{(n-a)} - \sum_{j=1}^{\alpha} (-1)^{j-1} \binom{k-j}{j} \frac{(n-a)!}{(n-a-j)!} (K-a-j)^{(n-a-j)} \right)}{K^n} \quad (\text{B.6})$$

con las siguientes condiciones:

$$0 \leq a \leq \min(n, K),$$

$$\alpha = K - a - 1, \quad n > K.$$

El límite superior de la sumatoria está determinado por el número de las  $(K-a)$  cajas en las que puede colocarse una de las  $(n-a)$  bolas. Nótese que si  $(K-a) \geq (n-a)$  ( $K \geq n$ ) podrían llegar a haber  $(n-a)$  cajas con una única bola. Sin embargo, si  $(n-a) > (K-a)$  ( $n > K$ ) puede haber como máximo  $(K-a-1)$  cajas con una bola.