

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

DEPARTAMENTO DE COMUNICACIONES



TESIS DOCTORAL

«MODELOS PARA EL ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DE
ADMISIÓN EN REDES CELULARES»

Autor: José Manuel Giménez Guzmán
Ing. de Telecomunicación

Directores: Jorge Martínez Bauset
Vicent Pla Boscà
Dres. Ingros. de Telecomunicación

VALENCIA
JUNIO 2008

The mere formulation of a problem is far more essential than its solution, which may be merely a matter of mathematical or experimental skills. To raise new questions, new possibilities, to regard old problems from a new angle requires creative imagination and marks real advances in science.

Albert Einstein

Agradecimientos

En primer lugar, quiero mostrar mi más profundo agradecimiento a mis directores de tesis, Jorge y Vicent. Además de ser unos excelentes directores de tesis, han sido capaces de transmitirme su entusiasmo y pasión por la investigación. También me gustaría agradecer la inestimable ayuda e incansable trabajo de Vicente y sin el cual esta tesis no sería posible. Finalmente, me gustaría mencionar a Pablo, que siempre se ha mostrado dispuesto a ayudarme en las situaciones en las que lo he necesitado.

También me gustaría agradecer a los que son (M^a José y Elena) y a los que han sido (David, Ángel y Nacho) mis compañeros de laboratorio durante todos estos años. Ellos han sido el día a día de esta tesis, por lo que quiero agradecerles su paciencia y apoyo constante. En especial, me gustaría mencionar a M^a José, ya que además de ser compañeros he tenido la suerte de trabajar junto a ella. Su valía y paciencia han hecho que trabajar con ella haya sido una experiencia muy enriquecedora.

También quiero agradecer el apoyo institucional por parte de la Unión Europea a través de las redes de excelencia EuroNGL, EuroFGI y EuroNF, por parte del Ministerio de Ciencia y Tecnología a través de los proyectos TIC2000-1041-C03-02 y TIC2003-08272 y por parte del Ministerio de Educación y Ciencia a través del proyecto TSI2005-07520-C03-03. Finalmente, quiero expresar mi agradecimiento a la Universidad Politécnica de Valencia por haberme otorgado una beca de formación de personal investigador predoctoral a través del *programa de incentivo a la investigación*.

Finalmente, y no por ello menos importante, me gustaría dedicarle unas líneas a Laura, a mi padres y a mi hermano. Ellos son los que dan sentido a mi vida y han sabido siempre apoyarme y darme aliento continuo. Muchas de las horas invertidas en este trabajo se las he robado a ellos y a pesar de ello siempre me han mostrado el cariño y comprensión necesarios que sólo las grandes personas pueden dar.

Abstract

In the last decade, cellular networks have experienced an enormous popularization, being even much higher than the initial most optimistic forecasts. The interest aroused among users has made cellular networks to become the most profitable sector in telecommunications. Although the number of users is not expected to increase due to the fact that the number of mobile lines is higher than the population in many countries, there exists a wide range of new challenges for operators in order to offer attractive and competitive services to users. These new services are expected to demand also a higher amount of resources. For the research community, this calls for the necessity of developing more efficient and complex resource management mechanisms in order to guarantee some requirements of quality of service. Traditionally, to design these resource management mechanisms the starting point has been their corresponding proposals for fixed networks. Notwithstanding, cellular networks add some new challenges due to the scarcity of the spectrum, the randomness in propagation and the mobility of terminals.

The framework of this thesis are cellular networks that implement admission control policies. More concretely, in the first part of the thesis some analytical cellular models have been proposed to study the impact of retrials produced in a system when the admission controller blocks an access request to the system. This contribution is done in both the development of useful techniques for solving retrial systems and in the application of those techniques to cellular network models to understand the impact that retrials have on performance. The second part of the thesis is devoted to the design of

optimal admission control policies. Since in current cellular networks it is possible to estimate the future behaviour of terminals from information like its position, velocity, historic behaviour, location in a road map. . . we have incorporated this information into the admission control optimization process.

Resum

Durant l'última dècada s'ha produït una enorme popularització de les xarxes cel·lulars, sent fins i tot molt superior a les previsions inicials més optimistes. L'interés que ha despertat entre els usuaris ha provocat que siga en la actualitat el sector de les telecomunicacions més profitós per als operadors. Encara que la quantitat de usuaris no es preveu que augmente al mateix ritme a que ho ha fet fins ara, perquè el nombre de línies mòbils es superior al d'habitants en molts països, existix tota una sèrie de nous desafiaments per als operadors per a poder oferir serveis atractius i competitius als usuaris. Aquests nous serveis es preveu que demanden així mateix una major quantitat de recursos. Per al món de la investigació, això suposa la necessitat de desenvolupar mecanismes cada vegada més eficients i complexos que gestionen el recursos adequadament per garantir uns certs requisits de qualitat de servei. Tradicionalment, per al disseny d'aquests mecanismes de gestió de recursos s'ha partit de las propostes realitzades per a xarxes fixes. No obstant això, les xarxes cel·lulars introdueixen nous reptes per l'escassetat de l'espectre radioelèctric, l'aleatorietat de la propagació i la mobilitat dels terminals.

La present tesi doctoral pren com a marc de treball les xarxes cel·lulars que implementen polítiques de control d'admissió. De forma més concreta, en la primera part de la tesi doctoral s'han desenvolupat models analítics que permeten estudiar l'impacte del accessos repetitius que es produeixen en un sistema quan el controlador d'admissió decideix bloquejar una petició d'accés al sistema. Aquesta contribució es realitza en dos aspectes: el desenvolupa-

ment de tècniques de resolució de sistemes amb reintents i l'aplicació d'eixes tècniques a models de xarxes cel·lulars a fi de comprendre l'impacte que els reintents tenen en elles. La segona part de la tesi doctoral està enfocada al disseny de polítiques òptimes de control d'admissió de sessions. Donat que en les xarxes cel·lulars actuals és possible estimar el comportament futur dels terminals a partir d'informació com la seua posició, velocitat, comportament històric, situació a un mapa de carreteres... s'ha incorporat eixa informació predictiva en el procés d'optimització del control d'admissió.

Resumen

En la última década se ha producido una enorme popularización de las redes celulares, siendo incluso muy superior a las previsiones iniciales más optimistas. Este interés que ha despertado entre los usuarios ha provocado que sea en la actualidad el sector de las telecomunicaciones más productivo para los operadores. Aunque el número de usuarios no se prevé que aumente al mismo ritmo a como lo ha hecho hasta ahora porque el número de líneas móviles es superior al de habitantes en muchos países, existe toda una serie de nuevos desafíos para los operadores para poder ofrecer servicios atractivos y competitivos a los usuarios. Estos nuevos servicios se prevé que demanden asimismo una mayor cantidad de recursos. Para el mundo de la investigación, esto supone la necesidad de desarrollar mecanismos cada vez más eficientes y complejos que gestionen los recursos adecuadamente para garantizar unos requisitos de calidad de servicio. Tradicionalmente, para el diseño de estos mecanismos de gestión de recursos se ha partido de las propuestas realizadas para redes fijas. No obstante, las redes celulares introducen nuevos retos por la escasez del espectro radioeléctrico, la aleatoriedad de la propagación y la movilidad de los terminales.

La presente tesis doctoral toma como marco de trabajo las redes celulares que implementan políticas de control de admisión. De forma más concreta, en la primera parte de la tesis doctoral se han desarrollado modelos analíticos que permiten estudiar el impacto de los accesos repetitivos que se producen en un sistema cuando el controlador de admisión decide bloquear una petición de acceso al sistema. Esta contribución se realiza en dos aspectos: en el

desarrollo de técnicas de resolución de sistemas con reintentos y en la aplicación de esas técnicas a modelos de redes celulares con el fin de comprender el impacto que los reintentos tienen en ellas. La segunda parte de la tesis doctoral está enfocada al diseño de políticas óptimas de control de admisión de sesiones. Puesto que en las redes celulares actuales es posible estimar el comportamiento futuro de los terminales a partir de información como su posición, velocidad, comportamiento histórico, situación en un mapa de carreteras... se ha incorporado esa información predictiva en el proceso de optimización del control de admisión.

Índice general

1	Introducción	1
2	Gestión de recursos en sistemas celulares	11
2.1	Modelo del sistema	12
2.1.1	Modelo celular	12
2.1.2	Servicios portadores	13
2.1.3	Distribuciones estadísticas que describen una red celular	16
2.2	Calidad de servicio y la gestión de los recursos radio en las redes celulares	22
2.3	Control de admisión en redes celulares	24
2.4	Efecto de las políticas CAS: modelos de pérdidas y espera, abandono y reintentos	27
3	Reintentos en las redes celulares	33
3.1	Antecedentes	33
3.2	Los reintentos en sistemas fijos	36
3.2.1	Descripción del sistema y modelo markoviano exacto	37
3.2.2	Técnica de resolución aproximada	40
3.2.3	Resultados numéricos	44

3.3	Los reintentos en sistemas móviles	45
3.3.1	Encolado de los <i>handovers</i>	47
3.3.2	Reintentos automáticos de los <i>handovers</i>	63
3.4	Otros mecanismos de resolución	85
3.4.1	<i>Value extrapolation</i> en sistemas con reintentos	87
3.4.2	Aplicación a un escenario con impaciencia	89
3.4.3	Aplicación a un escenario sin impaciencia	100
3.4.4	Evaluación de VE	101
3.4.5	Comparación con otros métodos	107
3.5	Conclusiones	117
4	Políticas de control de admisión con predicción de movimiento	119
4.1	Antecedentes	119
4.2	Información predictiva y su aplicación al CAS	121
4.2.1	Información predictiva en redes celulares	121
4.2.2	Aplicación de la información predictiva al diseño de políticas CAS	126
4.3	Descripción del modelo empleado	129
4.3.1	Modelo celular	129
4.3.2	Información predictiva considerada	133
4.4	Procesos de decisión de Markov y aprendizaje reforzado	140
4.4.1	Procesos de decisión de Markov (MDP)	140
4.4.2	Otros métodos de optimización de MDP	143
4.4.3	Aprendizaje reforzado y su aplicación al diseño de políticas CAS	147
4.5	Evaluación de las políticas obtenidas mediante la técnica de los post-estados	158

4.6	Redes celulares monoservicio	161
4.6.1	Comparación con programación dinámica	161
4.6.2	Predicción estocástica y determinista	165
4.6.3	Evaluación comparativa	169
4.7	Redes celulares multiservicio	175
4.7.1	Representación del estado del sistema	176
4.7.2	Evaluación del uso de post-estados	181
4.7.3	Tiempo de anticipación óptimo	186
4.8	Conclusiones	192
5	Conclusiones	195
	 Apéndices	 201
A	Abreviaturas y acrónimos	201
B	Desarrollo de expresiones y matrices	205
B.1	Red celular con remarcados y encolado de <i>handovers</i>	205
B.1.1	Cálculo del valor de M y p	205
B.1.2	Estructura del generador infinitesimal	207
B.2	Red celular con remarcados y reintentos automáticos	210
B.2.1	Estructura del generador infinitesimal	210
B.2.2	Valor de las tasas para el cálculo de los parámetros de prestaciones	214
B.2.3	Cálculo del valor de M y p	215
B.3	Valores de las matrices para el método VE	221

C Publicaciones	223
C.1 Relacionadas con la tesis	223
C.1.1 Capítulo de libro	223
C.1.2 Revistas incluidas en <i>Journal Citation Reports</i>	223
C.1.3 Otras revistas	225
C.1.4 Congreso	227
C.2 Otras publicaciones	228
C.2.1 Revista	228
C.2.2 Congreso	228
 Bibliografía	 231

Índice de figuras

2.1	Tratamiento de las peticiones en las redes celulares.	28
3.1	Sistema sin movilidad.	38
3.2	Diagrama de transiciones del sistema sin movilidad.	39
3.3	Diagrama de transiciones del sistema sin movilidad para la técnica FM.	42
3.4	Error relativo del método FM.	45
3.5	Sistema celular con remarcados y encolado de <i>handovers</i>	49
3.6	Diagrama de transiciones del sistema con encolado de <i>handovers</i> para la técnica FM.	50
3.7	Impacto del método FM en el sistema celular con encolado de <i>handovers</i>	56
3.8	Evaluación del sistema celular con encolado de <i>handovers</i> (I).	57
3.9	Evaluación del sistema celular con encolado de <i>handovers</i> (II).	58
3.10	Impacto de la longitud de la cola para <i>handovers</i> (\ominus).	60
3.11	Impacto de la configuración FGC en el sistema celular con encolado de <i>handovers</i>	61
3.12	Redimensionado de recursos en redes celulares con encolado de <i>handovers</i>	64

3.13 Modelo del sistema con remarcados y reintentos automáticos. 66

3.14 Diagrama de transiciones del modelo con dos órbitas de reintentos. 68

3.15 Precisión de la metodología aproximada para el modelo con dos órbitas. 75

3.16 Modelo que considera los remarcados como sesiones nuevas. 76

3.17 Redimensionado de recursos para el modelo de dos órbitas considerando y no haciéndolo los remarcados. 77

3.18 Parámetros de prestaciones para diferentes configuraciones de los reintentos automáticos para el modelo con dos órbitas de reintentos. 78

3.19 Función de coste para el modelo con dos órbitas de reintentos, $\lambda_n = 12$ 80

3.20 Distribución del tiempo entre reintentos: impacto en P_b^n y P_b^h .
Leyenda: XY , X (Y) \equiv distribución para los remarcados (reintentos automáticos); $M \equiv$ exponencial, $D \equiv$ determinista. 81

3.21 Distribución del tiempo entre reintentos: impacto en u_n y u_h .
Leyenda: XY , X (Y) \equiv distribución para los remarcados (reintentos automáticos); $M \equiv$ exponencial, $D \equiv$ determinista. 82

3.22 Otras distribuciones para el tiempo medio entre remarcados en el modelo con dos órbitas de reintentos. 84

3.23 Aproximación analítica de un número máximo de reintentos automáticos determinista; $d = 5$, $P_{ih}^1 = 0$ 86

3.24 Sistema con reintentos con impaciencia considerado por VE. 89

3.25 Diagrama de transiciones del sistema con reintentos con impaciencia considerado por VE. 90

3.26 Modelo truncado y estados que aparecen en las ecuaciones de Howard fuera del modelo truncado. 95

3.27	Sistema con reintentos sin impaciencia considerado por VE.	100
3.28	Diagrama de transiciones del sistema con reintentos sin impaciencia considerado por VE.	101
3.29	Coste computacional de resolver p parámetros de prestaciones simultáneamente con VE.	106
3.30	Error relativo para FM, NR y VE en un sistema con impaciencia (I).	109
3.31	Error relativo para FM, NR y VE en un sistema con impaciencia (II).	110
3.32	Error relativo en función del tiempo de cálculo en sistema con impaciencia para diferentes métodos (I).	112
3.33	Error relativo en función del tiempo de cálculo en sistema con impaciencia para diferentes métodos (II).	113
3.34	Error relativo para P_b en función de Q en sistema sin impaciencia para diferentes métodos.	114
3.35	Error relativo para P_b en función del tiempo de cálculo en sistema sin impaciencia para diferentes métodos.	116
4.1	Modelo celular del sistema.	130
4.2	Modelo del AP de entrada.	135
4.3	Incertidumbre en la predicción.	136
4.4	Diagrama de funcionamiento del AP de salida.	139
4.5	Funcionamiento del método de iteración de política.	146
4.6	Políticas óptimas calculadas con DP.	148
4.7	Diagrama de bloques que conforman un problema RL.	149
4.8	Acciones del agente respecto a los <i>state(-action) values</i>	150
4.9	Estados, acciones, costes e instantes de decisión.	152
4.10	Funcionamiento de RL convencional y con post-estados.	156

4.11 Evaluación del uso de post-estados.	160
4.12 Diagrama de transiciones para el método DP.	162
4.13 Comparación entre DP y RL en escenario monoservicio.	164
4.14 Predicción estocástica en escenario monoservicio.	166
4.15 Utilización cuando se emplea predicción estocástica en escenario monoservicio.	168
4.16 Predicción determinista en escenario monoservicio.	170
4.17 Utilización cuando se emplea predicción estocástica en escenario monoservicio.	171
4.18 Comparación de esquemas de predicción.	174
4.19 Comparación de la utilización empleando diferentes esquemas de predicción.	175
4.20 Representación del estado de la célula.	177
4.21 Representación del estado de las inmediaciones.	178
4.22 Representación de la información predictiva.	180
4.23 Empleo de post-estados en escenario de dos servicios sin información predictiva.	182
4.24 Empleo de post-estados en escenario de dos servicios con predicción de entrada determinista.	183
4.25 Empleo de post-estados en escenario de cuatro servicios con predicción de entrada determinista.	185
4.26 Sensibilidad de T frente a la carga del sistema.	187
4.27 Sensibilidad de T frente al número de recursos.	188
4.28 Sensibilidad de T frente a la distribución del tiempo de residencia (I).	189
4.29 Sensibilidad de T frente a la distribución del tiempo de residencia (II).	190

4.30 Sensibilidad de T frente a la movilidad de los terminales. . . . 191

4.31 Robustez del tiempo de anticipación óptimo. 193

Índice de tablas

3.1	Tasas asociadas al sistema celular con encolado de <i>handovers</i> . . .	51
3.2	Tasas de transición del modelo con dos órbitas de reintentos. . .	67
3.3	Tasas de transición del modelo aproximado para el sistema de dos órbitas de reintentos.	70
3.4	Definición de la función de recompensa usando VE.	97
3.5	Valor mínimo de Q necesario para obtener errores relativos (ϵ_{P_b}) inferiores a 10^{-8}	103
3.6	Valor mínimo de Q necesario para obtener errores relativos ($\epsilon_{P_{ns}}$) inferiores a 10^{-8}	104
3.7	Valor mínimo de Q necesario para obtener errores relativos ($\epsilon_{N_{ret}}$) inferiores a 10^{-8}	105
3.8	Valores de Q mínimos para obtener errores relativos (ϵ) inferiores a 10^{-8}	108
3.9	Valor de Q mínimo para obtener errores relativos (ϵ) en P_b inferiores a 10^{-8} en sistema sin impaciencia.	115
3.10	Tiempo de cálculo para obtener errores relativos (ϵ) en P_b inferiores a 10^{-8} en sistema sin impaciencia.	117

Capítulo 1

Introducción

Las comunicaciones móviles en general, y las redes celulares en particular, han constituido el avance de las telecomunicaciones que mayor penetración e impacto ha tenido en la sociedad moderna. En apenas una década, en España se ha pasado de tener 10.2 líneas de telefonía móvil por cada 100 habitantes en 1997 a 103.2 líneas por cada 100 habitantes a finales de 2006 [CMT06], lo que ha supuesto el hito de superar por primera vez el número de líneas de telefonía móvil activas al número de habitantes. El aumento del número de servicios y el ancho de banda que requieren, así como el abaratamiento de los ya existentes, ha provocado además un notable incremento en el tráfico cursado por las redes celulares. Hay que destacar que, mientras que el crecimiento anual en el 2006 del número de usuarios en España ha sido del 8.3 %, el tráfico se ha incrementado un 19.6 % en este mismo período [CMT06].

Este enorme incremento de la demanda que realizan los usuarios de las redes de comunicaciones celulares requiere tomar medidas tanto en el diseño de las nuevas redes celulares como en la gestión de las ya existentes. Para paliar esta creciente demanda se pueden emplear varias medidas de forma aislada o conjunta. En primer lugar, la solución más inmediata parece ser la ampliación de la banda del espectro en la cual operan las compañías de telefonía móviles. Esta no parece una solución adecuada, ya que, de acuerdo

con [RWO95], "*Spectrum space is probably the most limited and precious resource available in the industrialised world. Continued allocation of additional spectrum to meet the cellular services' demand is simply out of the question*". Además, aunque en un principio cada nación gestiona el espectro radioeléctrico en su territorio, la realidad es que a menudo es coordinado a nivel continental o global, con el fin de abaratar costes de producción y facilitar el *roaming*¹ a nivel internacional. Otra posible solución es incrementar la eficiencia espectral mediante mecanismos de acceso al medio, codificaciones y/o modulaciones que permitan un mayor rendimiento del ancho de banda disponible [FNO99]. Hasta la fecha también se ha empleado para el propósito de aumentar la capacidad de las redes celulares la reutilización geográfica mediante la sectorización o el empleo de células cada vez más pequeñas [Lee91]. Este mecanismo ha resultado ser muy eficaz, aunque añade una serie de problemas como el incremento del coste de la instalación de nuevas estaciones base o la mayor complejidad de los procesos de búsqueda y localización de terminales o el mayor número de *handovers*². Además, en [VC00] se demuestra que conforme se reduce el tamaño de las células se reduce la eficiencia en la utilización de los recursos. Este hecho motiva el estudio de técnicas que realicen una gestión más eficiente de los recursos disponibles, siendo el mecanismo en el cual se centra la presente tesis doctoral.

Más concretamente, la presente tesis doctoral profundiza en uno de los mecanismos de gestión de los recursos radio más destacado: el control de admisión de sesiones (CAS) [GB06]. *Grosso modo*, el CAS es el mecanismo encargado de aceptar o rechazar las nuevas peticiones de acceso que existan en la red, tomando su decisión en función del compromiso entre maximizar

¹Habitualmente se emplea el término *roaming* para denominar a la capacidad de hacer y recibir llamadas en redes móviles fuera del área de servicio local. Aunque en España habitualmente se denomina "itinerancia", se ha preferido mantener el término anglosajón, ya que el término "itinerancia" no está recogido en el diccionario de la lengua española [Esp03].

²A pesar de que la palabra *handover* se traduce a la lengua española como "traspaso" y el diccionario de la lengua española [Esp03] lo define como el "traslado de algo de un lugar a otro" se ha preferido mantener el término anglosajón, por estar más extendido entre la comunidad científica hispanohablante.

la utilización de la red y, por consiguiente sus ingresos, mientras se garantiza la calidad de servicio (*QoS*) de las sesiones en curso en el sistema. El CAS constituyó un área de investigación notable por primera vez en la Red Digital de Servicios Integrados de Banda Ancha (RDSI-BA), aunque ha alcanzado su punto más álgido en el entorno de las redes celulares. Este tipo de redes añaden al diseño de políticas de CAS nuevos desafíos debidos a la ya mencionada escasez del espectro radioeléctrico, a su carácter aleatorio en la propagación y, sobre todo, debido a la movilidad de los terminales. Esta complejidad provoca que a día de hoy, todavía se publiquen numerosos artículos de investigación relacionados con esta materia.

La presente tesis doctoral toma como referencia las redes celulares que incluyen políticas CAS, tanto en su diseño como en su análisis. En una primera parte de la tesis se hace el análisis del impacto que tienen los intentos de acceso repetitivos en este tipo de redes. Esta parte pretende ser tanto una contribución al desarrollo de modelos analíticos y metodologías que nos permitan resolverlos como una contribución al impacto que tienen los reintentos en las redes celulares. Aunque los modelos analíticos que en esta parte se presentan pueden diferir de los sistemas reales por no capturar todos sus aspectos, suponen una primera aproximación que permite tanto comprender mejor los sistemas como dar tendencias y resultados cualitativos. Finalmente, los modelos analíticos permiten acercarnos con un paso más firme tanto a los modelos de simulación como a los prototipos, métodos más costosos en términos económicos y temporales. En una segunda parte de la tesis se analiza la importancia que tiene la información predictiva de movimiento de los terminales en el diseño óptimo de políticas CAS. En esta parte se pretende contribuir tanto con el perfeccionamiento de las técnicas de aprendizaje reforzado aplicadas al diseño del control de admisión mediante la introducción de los post-estados, como con los resultados obtenidos a partir de su aplicación.

Evolución de las comunicaciones inalámbricas y celulares

La posibilidad de poder desarrollar comunicaciones inalámbricas se intro-

dujo por primera vez en 1864 cuando el escocés James Clerk Maxwell propuso a la *Royal Society* las ecuaciones básicas del electromagnetismo. Sin embargo, no fue hasta 1887 cuando Heinrich Rudolph Hertz descubrió la radiación electromagnética en frecuencias UHF, tal y como había predicho Maxwell. Ya en 1893, Nikola Tesla fue el primero en demostrar públicamente en el Instituto Franklin de Filadelfia la transmisión inalámbrica. Poco después, y casi en paralelo, Guglielmo Marconi en 1895 y Aleksandr Popov en 1896 realizaron experimentos similares. En 1943, y tras 40 años de litigios relativos a las patentes, la Corte Suprema de EE.UU. reconoció a Nikola Tesla como el inventor de la radio. Otro hito destacado en la historia de las comunicaciones inalámbricas [Bel02] ocurrió el 23 de diciembre de 1900, cuando el canadiense Reginald Aubrey Fessenden, después de muchos intentos fallidos, transmitió voz sobre una distancia de 1600 metros en Cobb Island, Maryland mediante la técnica que hoy se conoce como modulación en amplitud (AM). Las primeras palabras que Fessenden transmitió fueron: *"Hello test, one, two, three, four. Is it snowing where you are Mr. Thiessen? If it is telegraph back and let me know"*. A pesar de la corta distancia y de la notable pérdida de calidad que sufrió la voz, fue inteligible, por lo que esa fecha se considera el nacimiento de la telefonía inalámbrica.

Con el paso de los años se fue mejorando la transmisión inalámbrica de voz, destacando el desarrollo del receptor superheterodino que todavía hoy se emplea. Este hecho se le debe a Edwin Howard Armstrong en el año 1918, aunque no estuvo exento de posteriores disputas legales por las patentes con Lucien Lévy en Francia y Walter Schottky en Alemania. La Primera Guerra Mundial supuso una importante prueba para el uso de transmisiones inalámbricas reduciéndose el tamaño de las radios. Tras la Primera Guerra Mundial se produjo un enorme aumento en el número de emisoras de radio, por lo que se hicieron los primeros esfuerzos por racionalizar el uso del espectro radioeléctrico en el primer congreso internacional de la gestión del espectro que tuvo lugar en Washington en 1927, estandarizando el uso de las frecuencias inferiores a 1,5 MHz. Las comunicaciones inalámbricas dieron un salto de calidad cuando en 1933 Edwin Howard Armstrong desarrolló la modu-

lación en frecuencia (FM), en contraposición a la modulación AM empleada anteriormente. La Segunda Guerra Mundial trajo consigo la producción masiva de equipamiento radio. Sin embargo, fue con la invención del transistor en 1947 en los Laboratorios Bell por John Bardeen, Walter Houser Brattain y William Bradford Shockley cuando se consiguieron radios de mucho menor tamaño y consumo de potencia, lo que popularizó su uso.

El primer servicio de telefonía móvil lo introdujo AT&T en 1946 en 25 ciudades de EE.UU. Este sistema se denominó *Mobile Telephone Service* (MTS) y se caracterizaba por no poseer una estructura celular y por requerir la intervención de un operador para establecer las llamadas. En 1969 se introdujo *Improved Mobile Telephone Service* (IMTS) que, ya no sólo empleaba la banda VHF como MTS sino que también usaba UHF. La mejora más notable de IMTS respecto a MTS es la automatización en el establecimiento de las llamadas, pero seguía careciendo de una estructura celular. También se introdujeron otros servicios similares que no emplearon una estructura celular tanto en Suecia como en Londres. Este último tuvo un cierto éxito, pero la escasez de ancho de banda limitó su uso. En [Web99, Soc02, BS99b], se puede obtener una visión más detallada de la historia temprana de las telecomunicaciones a nivel mundial y en [PS06] a nivel nacional.

Para superar el problema de compartir la banda del espectro radioeléctrico entre todos los usuarios que estén operando en la red y asimismo evitar grandes transmisiones de potencia se emplea el *concepto celular* propuesto en 1947 por D. H. Ring y, por entonces, únicamente con un interés teórico [HR97]. El concepto de célula se refiere a la división del área de cobertura en áreas más pequeñas, denominadas células, que están servidas por una o más estaciones base y que poseen una superficie variable dependiendo de la densidad de usuarios por metro cuadrado que en ella hayan y del tráfico que generen.

En 1979 el operador de telecomunicaciones japonés NTT desplegó en Tokio la primera red de telefonía móvil que empleaba el paradigma celular. Poco después aparecieron diversos estándares como NMT (*Nordic Mobile Te-*

lephony), AMPS (*Advanced Mobile Phone System*) o E-TACS (*Extended Total Access Communications System*), que fue el empleado en España. Estos sistemas analógicos pasaron a denominarse de 1ª Generación (1G) y se caracterizaban por el uso de una modulación FM de banda estrecha, lo que hacía comunicaciones robustas frente a ruido, interferencias y desvanecimientos. Asimismo empleaban un acceso múltiple por división en la frecuencia y duplexado por división en la frecuencia. Pese a sus características comunes, hay que destacar que estos estándares eran incompatibles entre sí.

En 1982 la *Conférence Européenne des administrations des Postes et des Télécommunications* creó el *Groupe Spécial Mobile*, con la tarea de desarrollar un sistema paneuropeo de comunicaciones móviles celulares, aunque esa tarea se le trasladó al *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) en 1989. Las primeras especificaciones de GSM (cuyas siglas pasaron a denominar *Global System for Mobile communications*), conocidas como *Phase I*, se publicaron en 1990, produciéndose el lanzamiento comercial de la tecnología en 1991 y 1992. En [RWO95] se puede encontrar un desarrollo más amplio de la historia y características de GSM. Además de GSM, aparecieron otros estándares con menor éxito como IS-95 (*Interim Standard 95*) o PDC *Personal Digital Cellular*. Todas estas tecnologías constituyeron los sistemas de 2ª Generación (2G), cuya principal característica respecto a los de 1ª Generación fue el uso de comunicaciones digitales.

Para paliar las bajas tasas de transferencia de datos ofrecidas en 2G y como paso intermedio antes de 3G se han propuesto algunos estándares con el objetivo de cubrir esa deficiencia, por lo que también se les ha denominado 2.5G. El estándar HSCSD (*High-Speed Circuit Switched Data*) supone una mejora de CSD (*Circuit Switched Data*), el mecanismo de transmisión de datos original de GSM. Al igual que en CSD, se emplea conmutación de circuitos, aunque se consiguen mayores tasas binarias que en CSD empleando diferentes métodos de corrección de errores en función de la calidad del canal radio y/o el uso de múltiples ranuras temporales. Posteriormente, y teniendo en cuenta que las comunicaciones de datos suelen ser a ráfagas se desarrolló el estándar GPRS (*General Packet Radio Service*) [BVE99], que permite la transferencia de

datos vía conmutación de paquetes en la interfaz radio sobre sistemas GSM. Teóricamente soporta tasas de hasta 171.2 kbit/s haciendo uso de las 8 ranuras temporales de una portadora simultáneamente. Como última mejora significativa del estándar GSM, EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*) modifica la capa física con el objetivo de conseguir unas tasas binarias superiores a las conseguidas con GPRS y que llegan a alcanzar las tasas definidas para el estándar 3G por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). Con esta tecnología se pueden conseguir tasas de transferencia de hasta 473.6 kbit/s.

La principal característica de los sistemas de 3ª Generación (3G) es su capacidad multimedia, la cual es posible gracias a las altas tasas binarias que soporta, así como su pretendido carácter global que permita la itinerancia de terminales móviles en cualquier país [LE02]. Con estos propósitos UIT propuso un estándar global para la 3ª Generación de comunicaciones inalámbricas llamado IMT-2000. Sin embargo, no se llegó a un acuerdo para conseguir un único sistema a nivel global, por lo que finalmente se aprobaron varios estándares que cumplieran con las especificaciones mínimas de IMT-2000 [LE02]. Entre estos estándares destacan cdma2000, desarrollado por CDG (*CDMA Development Group*), WCDMA, desarrollado por 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) y UWC-136HS, propuesto por UWCC (*Universal Wireless Communications Consortium*). Finalmente, hay que indicar que la respuesta europea a los requisitos impuestos por IMT-2000 para las redes 3G ha venido dada por UMTS (*Universal Mobile Telecommunications Service*), el cual se basa en los estándares WCDMA.

A pesar del lento y tardío despliegue de 3G, ya se están definiendo las características de lo que supondrá la 4ª Generación (4G) de tecnologías celulares. Aunque la elaboración de las tecnologías asociadas está en sus inicios, en [FFF⁺06] se define 4G como: *"4G will be a convergence platform providing clear advantages in terms of coverage, bandwidth, and power consumption. Moreover, it will offer a variety of new heterogeneous services, from pop-up advertisements to location-based and IP data-casting ones. All these characteristics will be supported by multimode/reconfigurable devices and the implementation of interworking ones"*.

Por lo tanto, y aunque su definición no está cerrada, el mundo académico y empresarial coinciden en que 4G se tratará de una red heterogénea basada en el protocolo IP y que representará una solución inalámbrica global para el usuario. El tiempo dirá en qué se convierte 4G realmente.

Estructura de la tesis

La presente tesis doctoral se estructura en cinco capítulos, siendo los dos primeros capítulos introductorios. Los dos capítulos siguientes incluyen las aportaciones realizadas en las dos grandes líneas de trabajo seguidas, mientras que el último capítulo realiza un breve resumen de las principales conclusiones de la tesis.

De forma más concreta, en el capítulo 2 se repasa brevemente el estado del arte relativo a la gestión de recursos en redes celulares, haciendo especial hincapié en las técnicas y metodologías propuestas hasta la fecha relativas al control de admisión en este tipo de redes. Posteriormente, el capítulo 3 profundiza en las contribuciones realizadas acerca del fenómeno de los reintentos en las redes celulares. En este capítulo se comienza, tras un breve repaso de la literatura aparecida hasta la fecha, con el desarrollo de una metodología que nos permita evaluar los modelos posteriores. A continuación se aplica esa metodología en diversos casos, considerándose las posibilidades tanto de encolar los *handovers* bloqueados como de que la red realice reintentos automáticos de estos. Finalmente, el capítulo 3 concluye con el desarrollo de una nueva metodología de resolución de sistemas con reintentos que se basa en las ecuaciones de Howard. El capítulo 4 reúne las aportaciones realizadas en el campo de la optimización de políticas de control de admisión en redes celulares. Analiza la utilidad que tiene el poseer información de los *handovers* tanto entrantes como salientes que van a tener lugar próximamente. Este estudio se hace tanto para redes celulares monoservicio como multiservicio y empleando técnicas denominadas de aprendizaje reforzado. En este capítulo también se detalla la contribución realizada relativa a la inclusión del concepto de los post-estados en el algoritmo de aprendizaje reforzado y se hace un análisis de la sensibilidad y de la robustez del tiempo óptimo de

anticipación en la predicción. Finalmente, el capítulo 5 recapitula el trabajo realizado destacando las principales conclusiones y apuntando las posibles líneas de trabajo futuro.

Capítulo 2

Gestión de recursos en sistemas celulares

En este capítulo se pretende acercar al lector a la temática principal de la presente tesis doctoral: el control de admisión como mecanismo de gestión de recursos en las redes celulares. Esta visión se hará haciendo una breve y, por supuesto, no exhaustiva revisión de la literatura relacionada aparecida hasta la fecha. El lector especializado quizás echará en falta algunas referencias clave, pero se ha tratado de analizar y citar únicamente aquellas referencias más vinculadas con la presente tesis. En cualquier caso, para tener una visión más general del tema se recomienda la lectura de [GB06].

El capítulo se estructura en cuatro partes. En una primera parte se analiza el modelo celular que se emplea como punto de partida en la tesis, describiendo las hipótesis y suposiciones empleadas. En una segunda parte se hace una rápida descripción de la gestión de recursos radio (RRM) que se efectúa en las redes celulares con el objetivo de garantizar una determinada QoS. En la tercera parte se profundiza en el mecanismo RRM abordado en la presente tesis: el control de admisión. Finalmente, en la última parte del capítulo se muestran diversos comportamientos que han sido recogidos en la literatura tras la decisión de aceptación o bloqueo que toma el control de admisión.

2.1 Modelo del sistema

2.1.1 Modelo celular

La principal idea que se esconde tras el concepto de red celular es la reutilización frecuencial en lugares diferentes. Así, las redes celulares emplean las mismas bandas del espectro radioeléctrico en células diferentes. En el presente trabajo se considera que la red está dividida en células, estando cada una de ellas servida por una única estación base y con una cantidad de recursos que se emplearán para satisfacer las demandas de los usuarios que se encuentren en su área geográfica. La asignación de recursos a las células puede realizarse de diferentes modos, siendo el más comúnmente empleado FCA (*Fixed Channel Allocation*). Así, las células no comparten sus recursos radio con otras células, asignándose estos en la fase de planificación de red. Aunque la flexibilidad que aportan esquemas como DCA (*Dynamic Channel Allocation*) o HCA (*Hybrid Channel Allocation*) permite gestionar el tráfico de una forma más eficiente, su uso está muy poco extendido, debido a su complejidad tanto desde el punto de vista de análisis como de implementación en las estaciones base celulares. Por ese motivo, en la presente tesis se tratará únicamente con un esquema FCA. En [KN96, HZ98, Tab01] se puede encontrar un análisis comparativo más detallado de diferentes propuestas FCA y DCA.

Conforme un terminal móvil se aleja de la estación base a la que pertenece en un determinado momento la señal tenderá a debilitarse debido a la atenuación de la señal con la distancia. De este modo, llegará un momento en el que la potencia de señal sea insuficiente y sea conveniente depender de otra nueva estación base de la que se reciba la señal con una mejor calidad. Al proceso mediante el cual un terminal pasa de depender de una estación base a otra se le denomina *handover*, *handoff* o, en castellano, traspaso. Para garantizar un *handover* entre dos células sin que se pierda la comunicación en curso, se diseñan las células de modo que exista un área de solape entre ellas.

Cuando se evalúan o analizan redes celulares, una suposición común es considerar que el tráfico está repartido por la red de forma homogénea, es decir, que la tasa de llegada de sesiones nuevas es la misma en todas las células y que la tasa de llegada y de salida de *handovers* coinciden en todas las células. Cuando estas condiciones se cumplan, se podrán calcular las prestaciones del sistema considerando únicamente una célula aislada. De hecho, en [OR01] se concluye que en un sistema celular homogéneo el uso de una célula aislada es suficiente para la mayoría de los propósitos de planificación y de análisis de redes celulares. Aunque la suposición de tráfico homogéneo en una red celular no es descabellada, resulta obvio que no resultará adecuada en absoluto cuando se quieran investigar grandes concentraciones puntuales de usuarios (generalmente denominadas *hot spots*) como aeropuertos, centros comerciales... Otra ventaja añadida del empleo de múltiples células en el estudio de redes celulares es que nos permite incorporar patrones de movilidad que incluyan trazados de calles o carreteras reales. Sin embargo, en la otra parte de la balanza hay un factor que hace que apenas se consideren múltiples células en el estudio de redes celulares: su complejidad computacional. De este modo, si no es mediante simulaciones, resulta complejo y en ocasiones inabordable el trabajar con más de una célula simultáneamente. Además del elevado número de estados, otro factor adicional que contribuye a la complejidad es la interrelación entre tasas de *handover* entre las diversas células, por lo que suele emplearse un algoritmo iterativo de punto fijo [BBP01, MS01]. A lo largo de la presente tesis doctoral se empleará la aproximación de considerar una célula aislada en el capítulo 3, mientras que en el capítulo 4 se considerarán adicionalmente las inmediaciones de la célula en estudio, proporcionando información predictiva de *handovers* de las células adyacentes a la célula en estudio.

2.1.2 Servicios portadores

Actualmente, hay que dar soporte a un amplio abanico de aplicaciones para que puedan cursarse por las redes celulares con unas determinadas garantías

de QoS. La heterogeneidad de estas aplicaciones provoca que demanden diferentes objetivos de QoS. Con esta finalidad se define un conjunto de servicios portadores que pueden solicitar las aplicaciones en función de las demandas de QoS que tengan. De este modo, los servicios portadores definidos para 3G [HT00] son:

1. Servicios conversacionales:

Este servicio portador está pensado para aplicaciones interactivas, con requisitos estrictos de *jitter*, de retardo extremo a extremo y de pérdidas. Los valores máximos de estos parámetros vienen determinados por la percepción humana, por lo que el incumplimiento de estas condiciones resultará molesto para el usuario. Además, suelen requerir un ancho de banda simétrico. La aplicación de tipo conversacional más comúnmente empleada es el servicio de voz, aunque se prevé un creciente uso de la videotelefonía.

2. *Streaming*:

Este servicio está pensado para soportar la transferencia de información, normalmente multimedia, de modo unidireccional y no interactiva. Las aplicaciones que usen este servicio portador no requerirán de cotas tan estrictas para el retardo máximo y el *jitter* como los servicios conversacionales. En particular, el *jitter* puede compensarse mediante el uso de técnicas de almacenado o *buffering*. Este tipo de aplicaciones usualmente implican la transmisión de audio y vídeo, servicios que cada vez tienen una mayor demanda, siendo las aplicaciones más características el vídeo bajo demanda (*VoD*) o la difusión de programas de radio o televisión.

3. Servicios interactivos:

Los servicios interactivos están pensados para las aplicaciones en las que un usuario solicita información a un equipo remoto, normalmente un servidor. Ejemplos de este tipo de servicios son la navegación web, la banca electrónica, las consultas a bases de datos... Además de estas aplicaciones ya ampliamente demandadas, se prevé el auge de

aplicaciones dentro de esta categoría como son los juegos en red y las aplicaciones dependientes de la localización (ya que no hay que olvidar que se trata de un servicio para redes móviles). Al tener que esperar el usuario la respuesta a su petición, es conveniente que el retardo extremo a extremo sea pequeño desde una perspectiva humana. Por otra parte, la información transferida debe ser idéntica a la original, por lo que la transmisión debe garantizar la integridad de esos datos.

4. *Background:*

Ejemplos de aplicaciones que demandan este servicio portador son el correo electrónico, los mensajes cortos (SMS) y los mensajes multimedia (MMS), así como la descarga de ficheros o el tráfico generado por aplicaciones P2P. En este caso no se tienen cotas para el retardo, pudiendo ser incluso del orden de minutos. Sin embargo, sí que debe garantizarse la integridad de esos datos.

En la presente tesis doctoral se consideran aplicaciones que presentan periodos de actividad, a los que se denominará sesiones, durante los cuales se ocupará una determinada cantidad de recursos. De este modo, se supondrá que cuando un usuario accede a la red celular porque inicia una sesión, se le hace una reserva de recursos a lo largo de toda su comunicación. Además, dicha reserva se mantiene fija mientras dure la sesión, esté usando o no los recursos, y se libera cuando finaliza la sesión. Por lo tanto, el funcionamiento es directamente equiparable a las aplicaciones que hacen uso del servicio portador conversacional. Dicho de otro modo, se corresponde al comportamiento de las redes de conmutación de circuitos. Sin embargo, también puede aplicarse al resto de servicios portadores si se entiende la cantidad de recursos consumidos por una sesión en sentido estadístico. Así, aunque los servicios portadores *streaming*, interactivos y *background* se gestionan de un modo más eficiente en las redes de conmutación de paquetes por su habitual perfil de tráfico a ráfagas, se pueden interpretar los recursos reservados desde un punto de vista estadístico mediante el concepto de ancho de banda efectivo [EM93, EE99].

2.1.3 Distribuciones estadísticas que describen una red celular

Para ser capaces de modelar redes celulares es necesario abstraer con precisión los principales parámetros que las definen. Entre estos parámetros se encuentran el tiempo entre llegadas de peticiones nuevas, el tiempo entre llegadas de *handovers*, el tiempo de residencia, el tiempo de duración de las sesiones, el tiempo de ocupación de los recursos, el tiempo de permanencia en el área de solape entre células y el tiempo entre reintentos. Así, se tratará de caracterizar la distribución estadística que siguen estos parámetros en las redes celulares con el objetivo de ser capaces de proponer modelos que se aproximen a la realidad. De modo preliminar se puede decir que la tendencia general es el considerar todos los tiempos anteriormente citados distribuidos exponencialmente. El motivo de esa decisión es por cuestiones de tratabilidad matemática, especialmente cuando se aborde el problema desde un punto de vista analítico. Aunque para la caracterización de algunos parámetros la hipótesis exponencial se ha demostrado como inadecuada, tampoco existe unanimidad en la caracterización de algunos parámetros. En la presente tesis doctoral se emplea de forma general la distribución exponencial para modelar los citados parámetros, en gran parte debido al carácter analítico de este trabajo. Sin embargo, en algunos casos también se han empleado otras distribuciones estadísticas para aquellos parámetros cuya exponencialidad se ha discutido más.

Llegada de peticiones nuevas

La caracterización del proceso de llegadas de peticiones nuevas como un proceso de Poisson¹ es quizás la hipótesis menos discutida en la literatura en cuanto a número de aportaciones se refiere. Intuitivamente, la naturaleza aleatoria e independiente de los usuarios genera un proceso de memoria nula, es decir, un proceso de llegada de Poisson. Sin embargo, en [BB97] se

¹Nótese que si un proceso de llegada es de Poisson el tiempo entre llegadas estará distribuido exponencialmente.

demuestra que la aproximación de población infinita, inherente a tener un proceso de Poisson, está lejos de ser real y recomienda el empleo de modelos de población finita. Más concretamente, determina que el coeficiente de variación $(CV)^2$ del tiempo entre llegadas es inferior a la unidad. Sin embargo, y aunque los resultados se han obtenido a partir de medidas de campo, se ha hecho en una red PAMR (*Public Access Mobile Radio*), la cual es inalámbrica, pero no celular. Ya referido a un sistema celular, en [BS99a] se determina que el tiempo entre llegadas del proceso agregado de sesiones nuevas y *handovers* sigue una distribución suave, es decir, $CV < 1$. Desgraciadamente, considera ambos flujos (sesiones nuevas y *handovers*) como un único flujo agregado, por lo que no aporta información concreta del flujo de sesiones nuevas. Un estudio que no considera que el proceso de llegada de sesiones nuevas como de Poisson es [AL02], donde se emplea un modelo más general como es un *Markovian Arrival Process* (MAP). El caracterizar el proceso de llegadas como MAP se hace con el objetivo de dotar de generalidad a los resultados, pero el modelo es difícilmente tratable y, de hecho, no muestra resultados numéricos.

Llegada de *handovers*

La caracterización del proceso de llegada de *handovers* ha sido un tema que ha centrado el interés de numerosos trabajos de investigación, sin llegar a conclusiones unánimes. Quizás esta disparidad de opiniones se deba al hecho de que el estudio del proceso de llegada de *handovers* se base en un modelo tanto para el proceso de llegadas nuevas (habitualmente consideradas como un proceso de Poisson) como para el tiempo de residencia en la célula. En este último aspecto, Zeng y Chlamtac [ZC99] demuestran que el tiempo de residencia influye en el tráfico de *handovers*. Más concretamente, si se tiene un tiempo de residencia caracterizado por una distribución Gamma, en [ZC99] se demuestra que el proceso de llegadas de *handovers* dista de ser poissoniano.

Probablemente, el primer trabajo que consideró la caracterización del pro-

²El coeficiente de variación (CV) de una variable aleatoria X se define como el cociente entre la desviación típica y la media, es decir, $CV_X = \sigma_X / E[X]$.

ceso de llegada de *handovers* fue el de Chlebus y Ludwin [CL95], donde se muestra que el proceso de llegada de *handovers* sigue un proceso de Poisson cuando el proceso de llegada de peticiones nuevas es de Poisson y no existe bloqueo. No obstante, y aunque determina que la distribución del tiempo entre *handovers* cuando hay bloqueo tiene $CV < 1$, concluye que la caracterización poissoniana representa una buena aproximación. En [SS97] se demuestra que la aproximación de Poisson para el proceso de llegada de *handovers* es razonable cuando se tiene tráfico homogéneo a lo largo de un gran número de células, mientras que no lo es tanto cuando se consideran redes con un pequeño número de células o se tiene tráfico no homogéneo. Rajaratnam y Takawira muestran en [RT97] que caracterizar mediante un proceso de Poisson la llegada de *handovers* no es adecuado cuando la movilidad de los terminales es alta. En [OR01], Orlik y Rappaport muestran que el uso de modelos complejos para la caracterización del proceso de llegada de *handovers* no producirá diferencias significativas en los principales parámetros de mérito del sistema respecto a los resultados obtenidos cuando se usa una célula aislada y un proceso de Poisson para la llegada de *handovers*, aunque parten de la suposición de homogeneidad. Ante la diversidad de opiniones y resultados y, ante la falta de unanimidad, en [DTL03] Dharmaraja et al. modelan el tiempo entre llegadas de *handovers* mediante distribuciones con diversos CV: erlanguiana ($CV < 1$), exponencial ($CV = 1$) e hipereponencial ($CV > 1$). El resultado obtenido muestra que el tomar un tipo de distribución u otra para el proceso de llegada de *handovers* afecta a las prestaciones del sistema, teniendo un bloqueo superior conforme crece CV.

Tiempo de residencia, de ocupación de los recursos y de duración de las sesiones

En redes celulares, el tiempo de residencia (*dwell time*, *cell residence time* o CRT) describe el tiempo que un terminal móvil está dentro de una célula, tenga o no una sesión activa. Por otra parte, el tiempo de ocupación de los recursos (*channel holding time* o CHT) se define como el tiempo que emplea un usuario haciendo uso de los recursos de una célula concreta. La definición del

tiempo de duración de las sesiones es trivial. El situar estos tres parámetros juntos se debe a la íntima interrelación existente entre ellos, ya que el tiempo de ocupación de los recursos vendrá determinado por el mínimo entre los otros dos parámetros.

La comunidad investigadora se ha centrado mayoritariamente en caracterizar CRT y CHT, dándole una menor importancia al tiempo de duración de las sesiones, ya que este estará más ligado a las aplicaciones específicas. Por otra parte, la caracterización del CRT estará más relacionada con la geometría celular y el patrón de movilidad de los usuarios. Finalmente y puesto que el CHT depende del CRT y del tiempo de duración de las sesiones, el CHT estará influido tanto por las aplicaciones como por la geometría celular y movilidad de los terminales.

En la literatura se ha caracterizado mediante un gran número de distribuciones estadísticas al CHT. Quizás debido al amplio número de parámetros de los que depende, no existe unanimidad en cuál es la distribución que mejor describe el CHT. Inicialmente, Hong y Rappaport [HR86] y Guérin [Gué87] determinaron que para una geometría celular circular, la aproximación del CHT mediante una distribución exponencial es adecuada. En [ZD97] se vuelve a demostrar la exponencialidad del CHT. Sin embargo, otros trabajos han empleado otras distribuciones muy variadas: Erlang-k [Rap93], hiperexponencial [OR98a], suma de hiperexponenciales [OR98a, OR98b], hipererlanguiana [Fan99], log-normal [JL96] o una combinación lineal de log-normales [BJ00]. Ante el elevado número de posibilidades propuestas para caracterizar el CHT, algunos autores como Rajaratnam y Takawira [RT01] dejan abierto el tema empleando varias distribuciones para el CHT: exponencial, Det-Neg³ y Gamma. Merecen especial atención la distribución Det-Neg y la Gamma, ya que al estar compuestas de dos parámetros pueden modelar un espectro más amplio de distribuciones que la exponencial, que se define mediante un único parámetro. Más concretamente, la distribución exponencial puede considerarse un caso particular de ambas y la

³La distribución Det-Neg es una combinación de una distribución determinista y otra exponencial.

distribución Erlang-k es un caso particular de la Gamma. Aunque la distribución Det-Neg no es capaz de modelar distribuciones suaves, la distribución Gamma ($\Gamma(c)$) sí que lo permite haciendo $c < 1$. En [RT01], el uso de la distribución Det-Neg se justifica para células de forma alargada como las que aparecen en las autopistas (*cigar-shaped*), donde la aproximación exponencial no resulta adecuada [RT99].

Tal y como se ha visto y, puesto que no existe unanimidad en la caracterización del CHT, resulta importante conocer la bondad del uso de una distribución exponencial para caracterizar el CHT. Sin embargo, tampoco existe unanimidad en este aspecto, ya que mientras que algunos trabajos [XT03, ZD97] muestran que la aproximación exponencial es adecuada, otros trabajos [LC97, HSSK02] presentan situaciones donde no lo es.

Respecto al tiempo de residencia existen menos estudios que aborden su caracterización. Además de la distribución exponencial, en [KZ97] se emplean las distribuciones Erlang, Gamma, uniforme, Weibull y determinista con el objetivo de comparar prestaciones. Se determina que mientras que la probabilidad de bloqueo es insensible a la distribución del CRT, la probabilidad de terminación forzosa sí que resulta afectada. Respecto a la distribución que mejor modela el CRT destaca el trabajo de Zonoozi y Dassanayake [ZD97], donde demuestran que el CRT debe caracterizarse mediante una distribución Gamma. Finalmente, hay que citar algunos estudios como [HSSK01, HSSK02], donde se han encontrado características de autosimilaridad tanto en el CHT como en el CRT. En un trabajo más reciente [Mac05] Machihara ha desarrollado una generalización de la fórmula de Erlang para redes celulares donde se demuestra que si se tratan las sesiones nuevas y los *handovers* del mismo modo, las prestaciones del sistema son insensibles a la distribución de duración de la sesión y al CRT.

Tiempo en el área de solape entre células

La caracterización del tiempo que pasa un usuario en el área de solape entre células no ha sido tan estudiado como otros parámetros quizás por-

que no es necesaria su caracterización cuando se estudia una célula aislada. La conclusión general alcanzada es que la distribución de este tiempo no es exponencial [RGS98, PCG02a] aunque en [PCG02b] se muestra que una distribución exponencial es una buena aproximación en muchos casos.

Tiempo entre reintentos

Como se analizará posteriormente en la Sección 2.4, los reintentos pueden deberse a dos posibles causas: al comportamiento humano tras haber sido bloqueado (remarcados) o a la propia red/terminal que trata de completar con éxito una sesión tras haber sido incapaz un tiempo antes (reintentos automáticos). Dado el diferente origen, no tienen porqué estar caracterizados por la misma distribución ni siquiera tener la misma media, que es habitualmente inferior en los reintentos automáticos.

Respecto al tiempo entre remarcados en redes celulares, se puede decir que este estará caracterizado mediante una variable aleatoria. De forma general, y comparando con los remarcados en las redes fijas, con los terminales móviles actuales el realizar un remarcado supone únicamente el presionar un botón del terminal, por lo que los tiempos medios entre remarcados en la telefonía celular son inferiores a los que se tienen en la telefonía tradicional⁴. Por simplicidad matemática el tiempo medio entre remarcados se ha considerado distribuido exponencialmente en la mayoría de publicaciones sobre la materia [MCL⁺01, TGM97]. En [AL02] Alfa y Li argumentan que el tiempo medio entre remarcados está más cerca de una distribución determinista que una exponencial, por lo que caracteriza este tiempo mediante una distribución *phase type* (PH). Del mismo modo, en [AP07] también se emplea una distribución PH para el tiempo medio entre remarcados, ya que su generalidad permite representar y/o aproximar un amplio rango de distribuciones estadísticas. Aunque serían de un interés indudable, se desconocen estudios de campo relativos a la medida del tiempo entre reintentos. Esta ausencia se

⁴A este respecto habría que puntualizar que la característica del remarcado fue incorporada a los terminales fijos hace años, si bien su uso no está tan generalizado.

debe quizás al hecho de que para un operador no resulta fácil diferenciar el primer intento de acceso a la red de los posteriores remarcados.

Estrictamente hablando, el tiempo medio entre reintentos automáticos no es una variable que deba ser caracterizada, ya que corresponde al diseño de las redes celulares o de los terminales, en función de donde se implemente la función. Sin embargo, conviene conocer qué tipo de distribución se suele emplear para este parámetro. Por ejemplo, en [CGK97] se consideran los reintentos automáticos en redes de comunicaciones fijas, empleándose una distribución determinista para el tiempo medio entre reintentos. En [ODEa02], el único estudio que se conoce donde se describen los reintentos automáticos en redes celulares, también se emplea una distribución determinista para este parámetro por su facilidad de implementación.

Otro aspecto que conviene tener en cuenta es la caracterización del número máximo de reintentos que modelen el hecho de la impaciencia. En los remarcados, habitualmente y por tratabilidad matemática se emplea una probabilidad de abandonar el sistema cada vez que la petición es rechazada [MCL⁺01, TGM97]. En los reintentos automáticos se suele emplear un número máximo determinista [CGK97, ODEa02].

2.2 Calidad de servicio y la gestión de los recursos radio en las redes celulares

En la recomendación UIT-T E.800 se define la calidad de servicio (QoS) como el colectivo de prestaciones que determinan el grado de satisfacción de los usuarios de un servicio. A partir de esa definición, resulta obvia la necesidad de disponer de mecanismos que garanticen esas prestaciones. Con ese objetivo, se han definido un conjunto de algoritmos que gestionan el uso de los recursos radio, denominados colectivamente *radio resource management* (RRM). En [HT00, PRSADG05] se puede encontrar una descripción más detallada de los algoritmos RRM. La funcionalidad de los algoritmos RRM pretende

garantizar una determinada QoS en las redes celulares. De entre las funciones asociadas al sistema RRM se describen las definidas para 3G, siendo las principales:

- **Control de admisión:**
El objetivo del controlador de admisión es garantizar unos determinados objetivos de QoS para las sesiones que están en curso en el sistema. Con esa finalidad el controlador de admisión decidirá si una nueva sesión o un *handover* debe ser admitido de forma que se cumplan los objetivos de QoS tanto para esa sesión como para las que ya están en curso en el sistema.
- **Planificación de paquetes y gestión de *buffers*:**
La finalidad del planificador de paquetes y del gestor de *buffers* es conseguir unos determinados objetivos en términos de retardo, variación del retardo (*jitter*) y pérdidas de los paquetes. Para ello, decide qué paquetes deben transmitirse en primer lugar (prioridad temporal) y qué paquetes deben ser descartados cuando no exista memoria disponible para ellos (prioridad espacial).
- **Control de potencia:**
Los algoritmos de control de potencia proveen de protección contra efectos adversos en la propagación como los denominados *shadowing*, *fast-fading* y el efecto *near-far*. Todos estos efectos provocan una fluctuación en la potencia de la señal recibida. La protección se consigue controlando la potencia que emiten los usuarios de modo que se mantenga una relación señal a ruido determinada.
- **Control de *handovers*:**
Para poder proporcionar un servicio ininterrumpido a los terminales inalámbricos mientras estos se mueven entre células, el control de *handovers* especifica un conjunto de reglas que inician el proceso de petición de cambio de estación base a la cual está conectada un terminal móvil. Una técnica de control de *handovers* debe por tanto asegurar que las

sesiones se sirven siempre en la estación base más adecuada para garantizar eficiencia en el uso de recursos, evitar la terminación forzosa de sesiones en curso y proveer una QoS adecuada.

2.3 Control de admisión en redes celulares

Las políticas de control de admisión de sesiones (CAS) se han diseñado de formas diversas en la literatura. El enfoque más común de diseño de políticas CAS es heurístico, es decir, se propone una nueva política CAS y se evalúan sus prestaciones, comparándola con otras propuestas para evaluar sus ventajas e inconvenientes. Ejemplos de este enfoque los podemos encontrar en [Bar04, DS04, PCG05]. El segundo enfoque, menos empleado pero más adecuado, es el de plantear el problema de diseño de la política como el de un proceso de optimización. Para este enfoque hay que definir el problema de optimización de forma adecuada para poder abordarlo mediante alguna de las técnicas de optimización disponibles. Usualmente se plantea el problema de optimización como un proceso de decisión markoviano o semimarkoviano (MDP o SMDP) [Ros70] aunque también se puede plantear de otro modo. Dos trabajos muy referenciados que emplean optimización en redes celulares monoservicio son [RTN97, Bar01]. Para el diseño óptimo de políticas de control de admisión también se han empleado métodos como programación lineal [BC02, PCG03], algoritmos genéticos [YR97], *hill climbing* [GRMBP04, GRMBP05] o aprendizaje reforzado [EAYH01, PGGMBCG04].

Por otra parte, en el diseño de políticas CAS se pueden tener en cuenta diferentes parámetros. La mayoría de estudios realizados hasta la fecha basan la decisión de aceptación/rechazo en el estado de la célula donde hay que realizar el control de admisión. Las políticas que así funcionan se dice que emplean información local. Esa información suele estar formada por el número de recursos ocupados de forma conjunta o de forma individual por cada servicio, o bien por el número de sesiones en curso de cada servicio. Sin

embargo, adicionalmente se pueden basar las decisiones de control de admisión en información no local. Así, sabiendo lo que ocurre en las células vecinas tenemos cierta información sobre los *handovers* futuros. En una primera aproximación se puede emplear información del estado de las células vecinas además de la local para tomar decisiones. En [YR97] se demuestra que la información del estado de las células vecinas apenas es capaz de conseguir políticas CAS de prestaciones ligeramente superiores. Puesto que la información del estado de ocupación de las células vecinas no es suficientemente precisa, existe un grupo de propuestas que tratan de sacarle rendimiento al hecho de que, en las redes celulares, es factible tener algún tipo de estimación predictiva de los *handovers* antes de que estos ocurran, como se hace en [PGGMBBCG04]. Esa información predictiva puede obtenerse a partir del estado de las células vecinas, de la velocidad y trayectoria de los terminales, del trazado de las calles o carreteras, etc. En este sentido, se han propuesto numerosos trabajos que realizan esquemas de predicción de movimiento como son [LAN97, CS98, HF01, YL02, SK04].

Desde el punto de vista de su forma, e independientemente del tipo de información que consideren, las políticas CAS se pueden clasificar en tres categorías diferentes:

1. Políticas *trunk reservation*

Este tipo de políticas también se ha denominado de reserva de recursos⁵, *guard channel* (GC) o simplemente de reserva de canales. Constituyen el método más utilizado de control de admisión en redes celulares. La idea básica es la reserva de un número determinado de canales de guarda exclusivamente para *handovers*, de modo que las peticiones de nuevas sesiones se admiten únicamente si el número de canales disponibles excede el número de canales de guarda. Estos esquemas se introdujeron en la mitad de la década de los 80 [HR86, PG85] y desde

⁵Hay que destacar que realmente, todas las políticas de control de admisión realizan algún tipo de reserva de recursos. Sin embargo, tradicionalmente se le ha dado este nombre a las políticas del tipo *trunk reservation*.

entonces se han propuesto una gran cantidad de variantes, generalizaciones y mejoras.

La política *Fractional Guard Channel* (FGC), propuesta en [RTN97], realiza una reserva de canales fraccional, llevada a cabo mediante decisiones de admisión probabilísticas, lo cual permite un ajuste más fino de la política para satisfacer unas cotas de QoS determinadas. Variaciones de las políticas GC y FGC en escenarios monoservicio pueden encontrarse en [DS04, McM95, Sch90, DKA99, DS02]. Asimismo, una extensión de GC al caso multiservicio puede encontrarse en [CC97, LCL98] y de FGC en [HUCPOG03].

2. Políticas con solución en forma de producto

Algunas políticas CAS en redes celulares multiservicio producen un proceso de Markov cuyas probabilidades de estado pueden calcularse como el producto de las distribuciones marginales de cada servicio, sujetas a una constante de normalización, lo que simplifica la resolución de estos sistemas. Que el proceso subyacente sea reversible en el tiempo supone una condición suficiente para que una política tenga forma producto [Nel95]. Una observación importante es que una política *trunk reservation* no produce una forma producto. En [Ros95] se comparan diferentes métodos propuestos para obtener las probabilidades de estado en sistemas con forma producto. Cuando el número de recursos no es muy grande, un método particularmente interesante para obtener las probabilidades de estado en un sistema con forma producto es el método de convolución [Ive06].

Definiendo la capacidad del sistema como la tasa máxima agregada que puede ofrecerse a un sistema para cumplir unos objetivos para las probabilidades de bloqueo de sesiones nuevas y de *handover*, en [GRMBP04] se determina que las políticas *trunk reservation* superan a las políticas en forma producto aproximadamente en un 10 %, dependiendo del escenario estudiado. Por otra parte, las prestaciones de las políticas *trunk reservation* son más sensibles a la precisión en los valores definidos para

los umbrales, aunque manejan mejor las situaciones de sobrecarga que las políticas en forma producto.

3. Políticas estacionarias aleatorizadas

En [RTN97, Bar01] se justifica que la política de control de admisión óptima en una red celular monoservicio es del tipo *trunk reservation*. Sin embargo, este resultado no es generalizable al escenario multiservicio [BC02, PCG03], donde la política óptima pertenece a la familia de las políticas estacionarias deterministas o a la de las estacionarias aleatorizadas. Para las políticas estacionarias, la decisión sobre la admisión depende del estado actual del sistema, que se expresa como el número de sesiones de cada servicio en curso en el sistema. Para las políticas estacionarias aleatorizadas además se tiene en cuenta en la decisión un componente aleatorio. Así pues, debe notarse que las políticas *trunk reservation* forman un subconjunto de este tipo de políticas donde la decisión se toma teniendo en cuenta la cantidad total de recursos ocupados, y no la cantidad de los recursos que está ocupando cada servicio.

2.4 Efecto de las políticas CAS: modelos de pérdidas y espera, abandono y reintentos

Tras la decisión de aceptación/rechazo de la política CAS, se pueden tener diversas consecuencias, habiéndose contemplado en la literatura mediante modelos de colas que recogen de un modo u otro estos funcionamientos. En la Fig. 2.1 se puede encontrar un esquema de esas alternativas.

Cuando se efectúa una nueva petición de acceso al sistema (sea esta nueva o *handover*) se puede aceptar o rechazar. En el caso de que se acepte, se puede atender bien ocupando unos recursos que hasta ese momento estuvieran libres o bien haciendo algún tipo de degradación. Dentro de la degradación se contemplan las opciones de degradar la nueva sesión o las ya en curso o bien desalojar alguna sesión de menor prioridad previamente aceptada (*preem-*

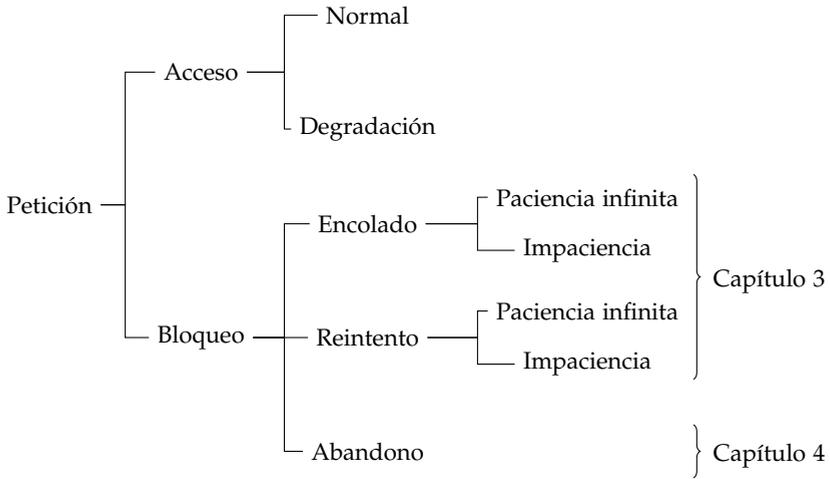


Figura 2.1: Tratamiento de las peticiones en las redes celulares.

ption). La opción más común en la literatura es la de ocupar recursos libres sin realizar desalojo o degradación de otras sesiones de menor prioridad. Esta alternativa ha sido asimismo la escogida a lo largo del presente trabajo.

Como consecuencia de bloquear una petición de acceso al sistema se pueden tener tres alternativas. La primera opción es situar la petición en una cola con el objetivo de esperar hasta que existan recursos disponibles y se decida que puede acceder al sistema. La segunda alternativa consiste en que la petición bloqueada puede reintentar su acceso tras un determinado tiempo, con la esperanza de poder acceder al sistema. La última alternativa tras el bloqueo de una sesión consiste en abandonar definitivamente el sistema. Además, dentro de las opciones de encolado y reintento hay que considerar dos posibilidades: la paciencia infinita y la impaciencia. En el primer caso, los usuarios son capaces de esperar en la cola o bien reintentar su acceso hasta que consiguen acceder al sistema, sin desistir en su intento. La opción de la impaciencia es más realista, puesto que considera que los usuarios no esperarán ni reintentarán su acceso hasta que lo consigan, sino que pueden desistir. Este comportamiento de la impaciencia modela tanto el comportamiento hu-

mano como la posibilidad de que el terminal se desplace a otra célula. En el presente trabajo se emplea la opción del encolado y reintento de peticiones bloqueadas en el capítulo 3 y del abandono en el capítulo 4.

En algunos casos se emplea una cola para situar las peticiones bloqueadas con un objetivo: minimizar las probabilidades de bloqueo y asimismo, paliar la disminución del tráfico ofrecido que acarrea el empleo de políticas CAS cuando existe reserva de recursos. Dentro de estos modelos hay que distinguir dos grupos. En primer lugar, la posibilidad más común consiste en considerar una cola para las peticiones de *handover* bloqueadas. En este sentido se puede emplear el encolado de *handovers* bloqueados para priorizarlos sobre los flujos de sesiones nuevas, como se hace en [PG85, HR86, LMN94, KN96, TRV98]. Por ese motivo, el tiempo máximo en el que los usuarios pueden esperar en las colas, vendrá determinado por el tiempo de permanencia del usuario en el área de solape entre células. Así, si el terminal abandona el área de solape deberá haberse realizado el *handover* o la sesión terminará abruptamente. Aunque muchos trabajos emplean una disciplina de servicio tipo FIFO (*First In First Out*) [HR86, PCG02b, GGDBMB⁺05], otros han propuesto priorizar dentro de la cola aquellas sesiones que previsiblemente abandonarán antes el área de solape [TJ91, TJ92, ET99, RFG99a, RFG99b, Fan00, XT04]. Aunque el encolado de *handovers* es positivo debido a la disminución de la probabilidad de terminación forzosa, la escasa sensibilidad al retardo que tiene el flujo de llamadas nuevas [TJ91, KN96] provoca que existan otros trabajos [Gué88, DJ92] que ven más factible el encolado de este tipo de peticiones bloqueadas como medida para incrementar el tráfico cursado. No obstante, es necesario decir que constituyen un número menor de artículos respecto a los que consideran el encolado de *handovers*. Por último, existen algunos trabajos que tienen en cuenta el encolado de peticiones bloqueadas tanto de sesiones nuevas como de *handovers* [YU93, CSC94, McM95, LJCP03].

Merecen una especial atención los modelos que incluyen los reintentos en las peticiones bloqueadas puesto que este fenómeno constituye el tema principal del capítulo 3. El fenómeno de los reintentos en las redes de comunicaciones ha sido profusamente estudiado para redes fijas cableadas [JS70,

YT87, Fal90]. Más recientemente, algunos artículos de investigación han estudiado el fenómeno de los reintentos en el contexto de las redes celulares mediante métodos analíticos [MCL⁺01, TGM97, DBGGMBCG05] o mediante simulación [CFL95, SKNS00].

Para superar situaciones de congestión y mejorar la utilización del sistema, en [Ekl86] se introdujo el concepto de *directed retry*. Según esta técnica, cuando una sesión no es capaz de establecerse en una célula porque la red no dispone de los recursos necesarios para ella, reintenta su acceso en las células vecinas, siempre y cuando esté en una zona de solape entre células, pudiéndose reducir así la probabilidad de pérdidas. A partir de la idea de *directed retry* surge la idea de los reintentos automáticos. La diferencia consiste en no tratar de acceder a las células próximas, sino el tratar de acceder a la misma célula en instantes próximos de tiempo, con la esperanza de que ya existan recursos disponibles. Concretamente, el sistema GSM presenta la posibilidad de reintentos automáticos [MP92], de modo que cuando una sesión resulta bloqueada la red puede reintentar su acceso automáticamente hasta un número máximo de ocasiones. Por este motivo, si bien hasta el momento se ha hablado de reintentos en general, en las redes móviles celulares podemos distinguir dos causas diferentes de estos. Por una parte los usuarios bloqueados reintentan manualmente su acceso, por lo que habitualmente se conocen estos reintentos como remarcados. Por otra parte, la red efectúa los denominados reintentos automáticos para disminuir la probabilidad de pérdidas. Además, un remarcado fallido puede llevar implícito varios reintentos automáticos. Ambos fenómenos apenas han sido estudiados conjuntamente, apareciendo ambos por primera ocasión en [ODEa02].

Desde un punto de vista analítico y para los reintentos en general, también se han estudiado profusamente las colas de reintentos definidas como un sistema de espera del tipo $M/M/C$ con un tiempo entre reintentos distribuido exponencialmente. Un estudio exhaustivo de estos sistemas supone un problema complejo debido en parte a la no homogeneidad del espacio de estados provocada porque la tasa de reintentos depende del número de usuarios reintentando su acceso. Una solución analítica de este modelo es

compleja, por lo que únicamente se han alcanzado soluciones explícitas para unos pocos casos particulares [Art96, FT97, GCR99]. Básicamente, en [AP02] se indica que no existen expresiones cerradas para el cálculo de las probabilidades de estado cuando el número de servidores es superior a dos.

Ante la dificultad de obtener de forma exacta los parámetros de prestaciones de los sistemas con reintentos, el problema se traslada al del desarrollo de métodos aproximados para poder obtener soluciones suficientemente precisas con un coste computacional razonable. En [AP02] se categorizan las diferentes metodologías existentes: aproximaciones, modelos truncados finitos y modelos truncados generalizados. La primera categoría, donde se encuentran [GW87, FT97], se refiere a la resolución de modelos simplificados que se aproximan al original. Sin embargo, la aproximación suele ser buena localmente, es decir, en un cierto punto de funcionamiento del sistema. Los modelos truncados finitos consisten en sustituir el espacio de estados infinito inicial por uno truncado finito [Wil56, Ste99]. Esta truncación puede incluir algún parámetro adicional que aporte mayor precisión al modelo, como en [FR79, MCL⁺01, DBGGMBCG05]. Finalmente, los métodos truncados generalizados⁶ como los descritos en [Fal83, NR90, AP02] sustituyen el complejo sistema de infinitos estados inicial por una aproximación, también con un número de estados infinito pero para la que hay solución analítica, por lo que habitualmente consiguen soluciones de mayor precisión.

⁶Nótese que aunque se hable de *modelos truncados generalizados*, el espacio de estados sigue siendo infinito.

Capítulo 3

Reintentos en las redes celulares

3.1 Antecedentes

Habitualmente cuando se estudian sistemas de comunicaciones se considera que los usuarios que no obtienen servicio de modo inmediato abandonan al sistema sin reintentar su acceso. Sin embargo, debido a la creciente complejidad y al creciente número de usuarios, el impacto de los reintentos no es insignificante, especialmente en redes celulares [TGM97]. Aunque en redes fijas cableadas el estudio de los reintentos ha sido profusamente tratado [YT87, Fal90, JS70], el problema de los reintentos en las redes móviles es diferente, en gran parte debido a la movilidad de los terminales. Además, a diferencia de lo que ocurre en las redes cableadas, donde el ancho de banda es relativamente barato y fácilmente ampliable, las redes inalámbricas se caracterizan por su escasez de recursos. Así, mientras que el sobredimensionado en las redes cableadas es una práctica habitual, no es así en las redes celulares, por lo que la probabilidad de tener una situación de sobrecarga y con ello un elevado número de reintentos es muy superior en las redes celulares.

En el presente capítulo se hace un estudio analítico del impacto de los

reintentos en las redes celulares. A pesar de que su impacto no es insignificante, en el campo de las redes celulares el estudio de los reintentos no ha recibido mucha atención por parte de la comunidad investigadora. Sin la pretensión de dar una lista exhaustiva, las referencias más destacadas que abordan el fenómeno de los reintentos en redes celulares desde un punto de vista analítico son [TGM97, MCL⁺01, AL02, ODEa02]. En [TGM97], Tran-Gia y Mandjes estudian el fenómeno de los reintentos en dos entornos celulares diferentes: el primero con población finita y política CAS del tipo *complete sharing* (CS)¹ y el segundo con población infinita y una política CAS del tipo *guard channel*. En ambos casos se concluye mediante métodos analíticos que es muy peligroso ignorar el comportamiento de los reintentos ya que las probabilidades de bloqueo son considerablemente superiores cuando se tienen en cuenta los reintentos. En [MCL⁺01], Marsan et al. desarrollan una técnica para calcular de un modo más eficiente los parámetros de prestaciones de una red celular que incluye reintentos. Alfa y Li [AL02] no se centran estrictamente en los reintentos, sino que resuelven analíticamente un modelo en el que el proceso de llegada no es de Poisson, sino que se hace uso de un proceso más general como es un *Markovian Arrival Process* (MAP). Asimismo, para el tiempo medio entre reintentos hacen uso de una distribución *phase-type* que puede representar un mayor rango de distribuciones para el tiempo medio entre reintentos. Finalmente, Onur et al. [ODEa02] introducen tanto el fenómeno de los reintentos automáticos como el de los remarcados en las redes celulares, calculando la carga que introducen en las redes GSM.

Desde un punto de vista más general y analítico, el campo de la investigación operativa ha estudiado profusamente el fenómeno de los reintentos. Habitualmente, estos estudios analizan el problema como un sistema de espera del tipo $M/M/C$ con reintentos. En [Art99a, Art99b] se puede encontrar una revisión de los principales resultados aparecidos en la literatura. De forma general, la solidez matemática de estos estudios nos aportan conclusiones esenciales para el posterior estudio de los reintentos en las redes celulares.

¹Se denomina política *complete sharing* (CS) a aquella política CAS que no realiza reserva de recursos para ningún flujo, es decir, es equivalente a la ausencia de política.

Básicamente, el resultado de mayor impacto en este trabajo es que el análisis de un sistema $M/M/C$ con un tiempo entre reintentos distribuido exponencialmente es complejo debido a la no homogeneidad a lo largo de una dimensión infinita del espacio de estados. Esta no homogeneidad se debe a que la tasa con la que los usuarios reintentarán dependerá del número de usuarios en la órbita de reintentos². La complejidad de este tipo de sistemas provoca que sólo existan resultados analíticos para algunos casos particulares, más concretamente cuando el número de servidores es igual o inferior a 2 [Art96, FT97, GCR99]. No obstante, existen algunos artículos que tratan de resolver analíticamente sistemas con reintentos con un número de servidores arbitrario, aunque los resultados no son aplicables a nivel práctico debido a la aparición de fracciones continuas extendidas [Pea89] o de integrales de contorno [Coh57].

Una vez planteada la dificultad analítica del estudio de los sistemas con reintentos, el problema se traslada al del desarrollo de metodologías que nos permitan calcular los principales parámetros de mérito de las redes celulares. En el campo de la investigación operativa, destacan los métodos de Falin [Fal83], de Neuts y Rao [NR90] y de Artalejo y Pozo [AP02]. Sin embargo, la aplicación de estos modelos a las redes celulares puede llegar a ser una tarea compleja si se pretende incluir fenómenos como la impaciencia, políticas CAS, *handovers*... En el campo de las comunicaciones celulares el desarrollo de modelos que permitan determinar con precisión y de modo eficiente los parámetros de mérito se centra en [MCL⁺01], superando de este modo la técnica empleada en [TGM97], que trunca el modelo cuando el espacio de estados es infinito.

El presente capítulo se estructura en tres partes. El objetivo de la sección 3.2 es el desarrollo de una técnica de resolución versátil que nos permita capturar determinados comportamientos de las redes celulares. La técnica desarrollada se basa en el modelo truncado finito propuesto por Marsan et al. en [MCL⁺01] aunque mejora sustancialmente las prestaciones de este úl-

²Se suele decir que un usuario está en la órbita de reintentos cuando tras algún bloqueo, va a intentar su acceso al sistema un tiempo después.

timo. En la sección 3.3, se aplica la técnica desarrollada a modelos de redes celulares con el objetivo de conocer el impacto del fenómeno de los reintentos en escenarios más complejos a los empleados en [TGM97]. La sección 3.4 se centra en el desarrollo y comparación de métodos de resolución de sistemas $M/M/C$ con un tiempo entre reintentos distribuido exponencialmente. Así, se comparan algunos de los métodos aparecidos en la literatura más conocidos y se propone un método cuya principal característica es que no se basa en el cálculo de las probabilidades de estado. Los resultados obtenidos muestran que el método propuesto alcanza soluciones muy precisas con un coste computacional muy reducido.

3.2 Los reintentos en sistemas fijos

En la sección anterior se ha expuesto que el problema clave en la resolución analítica de sistemas con reintentos es el desarrollo de técnicas que nos permitan calcular de un modo eficiente los parámetros de mérito. La aplicación de los métodos propuestos por Falin [Fal83], Neuts y Rao [NR90] y Artalejo y Pozo [AP02] a redes celulares con reintentos es, como mínimo, muy compleja, ya que la consideración de algunos fenómenos característicos de este tipo de redes como la impaciencia, el encolado de *handovers* bloqueados o la posibilidad de tener una órbita de reintentos para las sesiones nuevas y otra para los *handovers* hace que ya no se tenga el clásico sistema $M/M/C$ con reintentos. Por otra parte, el modelo de Marsan et al. [MCL⁺01] puede presentar ciertas deficiencias en determinados escenarios y para determinados parámetros de mérito, por lo que para los sistemas que se pretenden estudiar es necesario el desarrollo de una nueva técnica de resolución, que será el objetivo de la presente sección.

De forma adicional a la probabilidad de bloqueo (P_b), existen otros parámetros de mérito que describen con mayor precisión los sistemas con reintentos:

- Probabilidad de servicio inmediato (P_{sij}): es la probabilidad de que un

usuario acceda al sistema en su primer intento.

- Probabilidad de servicio retardado (P_{sr}): es la probabilidad de que un usuario obtenga servicio, pero no en su primer acceso al sistema.
- Probabilidad de no servicio (P_{ns}): es la probabilidad de abandonar el sistema por no haber obtenido servicio debido a la impaciencia. Nótese que $P_{ns} = 0$ cuando no se tiene en cuenta el fenómeno de la impaciencia.
- Número medio de usuarios en la órbita de reintentos (N).

Nótese que debe cumplirse $P_{si} + P_{sr} + P_{ns} = 1$. Algunos de estos parámetros suelen calcularse a partir de unas tasas propias de los sistemas con reintentos como son la tasa media ofrecida al sistema (R_0), la tasa de primeros intentos con éxito ($R_{1,s}$) y la tasa de primeros intentos fallidos ($R_{1,f}$). Obviamente, debe cumplirse que $R_0 = R_{1,s} + R_{1,f}$. Definiendo R_r como la tasa media de reintentos, $R_{r,s}$ como la tasa media de reintentos exitosos y $R_{r,f}$ como la tasa media de reintentos fallidos, podemos decir que $R_r = R_{r,s} + R_{r,f}$. Finalmente, podemos definir la tasa media de abandonos como R_{ab} . Así, las probabilidades descritas anteriormente podrán calcularse como:

$$P_{si} = \frac{R_{1,s}}{R_0}, \quad P_{sr} = \frac{R_{r,s}}{R_0}, \quad P_{ns} = \frac{R_{ab}}{R_0}.$$

3.2.1 Descripción del sistema y modelo markoviano exacto

Con el objetivo de evaluar las prestaciones del nuevo algoritmo de resolución, se ha escogido un modelo que permita conocer sus parámetros de prestaciones de forma exacta. Para ello, se ha empleado un modelo de población finita de U usuarios que tratan de acceder a C unidades de recurso o servidores, tal y como se observa en la Fig. 3.1. Estos usuarios demandan un tiempo de servicio distribuido exponencialmente con tasa μ . Cuando una nueva petición encuentra todos los servidores ocupados, pasa a la denominada órbita de

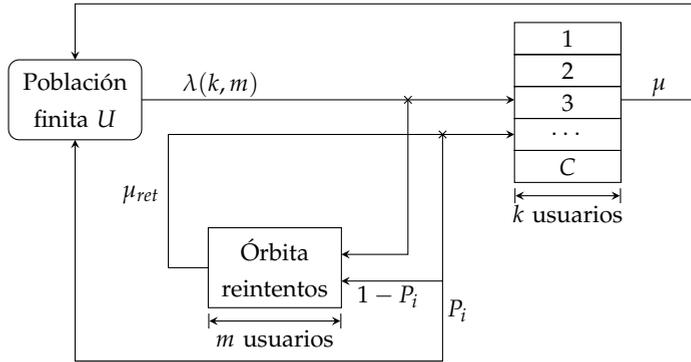


Figura 3.1: Sistema sin movilidad.

reintentos, cuya capacidad se considera infinita. Tras un tiempo distribuido exponencialmente con tasa μ_{ret} , se reintenta esa petición. El reintento se considera exitoso si encuentra algún servidor libre. En caso contrario, el usuario desiste de su intento de obtener servicio con probabilidad P_i o reintenta de nuevo con la probabilidad complementaria, esto es, $(1 - P_i)$. Obviamente, el parámetro P_i modela el fenómeno de la impaciencia, posibilitando el caso de paciencia infinita si $P_i = 0$. El proceso de llegada se modela como un proceso de Poisson dependiente del estado de tasa $\lambda(k, m) = (U - k - m)\lambda$, siendo k y m el número de usuarios con una sesión en curso y en la órbita de reintentos, respectivamente.

Una vez planteado el modelo que representa al sistema real (Fig. 3.1), se va a describir brevemente cómo se haría la resolución del mismo. El espacio de estados del proceso de Markov asociado al sistema descrito es

$$\mathcal{S} := \{(k, m) : 0 \leq k \leq C; 0 \leq m \leq U - C\},$$

donde k es el número de recursos ocupados y m es el número de usuarios en la órbita de reintentos. El diagrama de transiciones de este modelo se muestra en la Fig. 3.2. Como se observa en la figura, este diagrama consta de $(U - C + 1) \times (C + 1)$ estados. Debido a que las transiciones únicamente se producen entre niveles y fases adyacentes, el generador infinitesimal co-

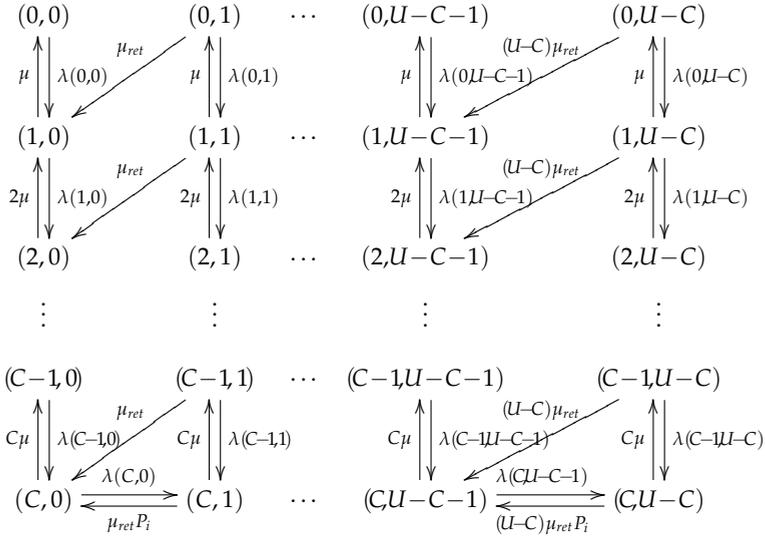


Figura 3.2: Diagrama de transiciones del sistema sin movilidad.

respondiente (\mathbf{Q}) del modelo propuesto presenta una estructura tridiagonal cuyos elementos son asimismo matrices, es decir, con la estructura clásica de un proceso QBD (*Quasi Birth and Death process*) [Neu81].

Puesto que se ha escogido un sistema de dimensión finita, podemos conocer las probabilidades de estado (π) resolviendo el sistema $\pi\mathbf{Q} = \mathbf{0}$ junto con la condición de normalización $\pi\mathbf{e} = \mathbf{1}$, donde \mathbf{e} es un vector cuyos elementos son la unidad.

Los parámetros de mérito pueden calcularse a partir de las probabilidades de estado usando:

$$P_b = \sum_{m=0}^{U-C} \pi(C, m),$$

$$N = \sum_{k=0}^C \sum_{m=0}^{U-C} m\pi(k, m).$$

Y para las probabilidades P_{si} , P_{sr} y P_{ab} se emplearán las siguientes tasas:

$$\begin{aligned}
 R_o &= \sum_{k=0}^C \sum_{m=0}^{U-C} \lambda(k, m) \pi(k, m), \\
 R_{1,s} &= \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{U-C} \lambda(k, m) \pi(k, m), \\
 R_{1,f} &= \sum_{m=0}^{U-C} \lambda(C, m) \pi(C, m), \\
 R_r &= \sum_{k=0}^C \sum_{m=0}^{U-C} m \mu_{ret} \pi(k, m), \\
 R_{r,s} &= \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{U-C} m \mu_{ret} \pi(k, m), \\
 R_{r,f} &= \sum_{m=0}^{U-C} m \mu_{ret} \pi(C, m), \\
 R_{ab} &= P_i R_{r,f}.
 \end{aligned}$$

3.2.2 Técnica de resolución aproximada

Aunque para el sistema planteado podemos calcular los parámetros de mérito de modo exacto, en esta sección se va a plantear una técnica de resolución que permita conocer de forma aproximada esos parámetros de mérito reduciendo el coste computacional. Sin embargo, el principal objetivo del método será el de resolver sistemas con reintentos con población infinita de forma aproximada, ya que en esos casos no se dispone de soluciones cerradas, como se ha especificado en la sección 3.1.

La técnica de resolución propuesta, a la que denominaremos *método finito* (FM) puede considerarse como una generalización del modelo propuesto por Marsan et al. en [MCL⁺01] ya que agrega estados a partir de un determinado nivel (al que llamamos Q) del QBD que describe el proceso con reintentos. Así, cuando $Q = 1$ se tiene el modelo propuesto en [MCL⁺01]. El proceso de

Markov asociado tiene el siguiente espacio de estados:

$$\mathcal{S} := \{(k, m) : 0 \leq k \leq C; 0 \leq m \leq Q\},$$

donde k representa el número de servidores ocupados y m (cuando $m < Q$) es el número de usuarios en la órbita de reintentos. El conjunto de estados (k, Q) representa aquellas situaciones en las que hay Q o más usuarios en la órbita de reintentos. En la Fig. 3.3 se representa el diagrama de transiciones asociado a este modelo donde se observa que las primeras $Q - 1$ columnas coinciden con las del modelo markoviano exacto. Para la última columna se aproxima la tasa de llegadas mediante $\lambda(k, Q) = (U - k - M)\lambda$, donde M representa el número medio de usuarios en la órbita de reintentos cuando tiene Q o más usuarios. Cuando un usuario de la órbita de reintentos realiza un reintento con éxito, entonces el número de usuarios en la órbita de reintentos puede caer por debajo de Q con probabilidad $(1 - p)$ o no hacerlo con probabilidad p . Por lo tanto, la tasa de reintentos en los estados (k, Q) puede separarse en dos contribuciones. La primera corresponde a las transiciones $(k, Q) \rightarrow (k + 1, Q - 1)$ y se aproxima mediante $\alpha = M\mu_{ret}(1 - p)$. La segunda corresponde a las transiciones $(k, Q) \rightarrow (k + 1, Q)$ y puede aproximarse mediante $\beta = M\mu_{ret}p$. El generador infinitesimal del modelo propuesto mantiene la estructura tridiagonal a bloques del modelo exacto.

Ahora los parámetros de mérito se calcularán usando:

$$P_b = \sum_{m=0}^Q \pi(C, m),$$

$$N = \sum_{k=0}^C \sum_{m=0}^{Q-1} m\pi(k, m) + \sum_{k=0}^C M\pi(k, Q).$$

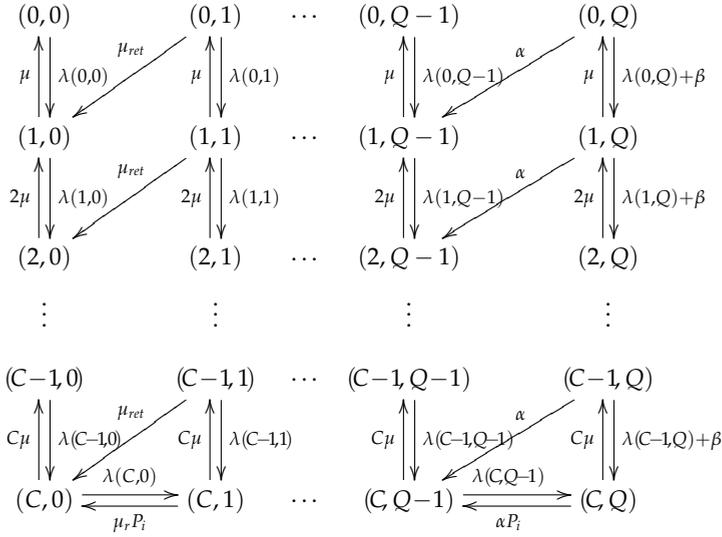


Figura 3.3: Diagrama de transiciones del sistema sin movilidad para la técnica FM.

Asimismo, se pueden calcular P_{si} , P_{sr} y P_{ns} a partir de:

$$\begin{aligned}
 R_o &= \sum_{k=0}^C \sum_{m=0}^Q \lambda(k, m) \pi(k, m), \\
 R_{1,s} &= \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^Q \lambda(k, m) \pi(k, m), \\
 R_{1,f} &= \sum_{m=0}^Q \lambda(C, m) \pi(C, m), \\
 R_r &= \sum_{k=0}^C \sum_{m=0}^{Q-1} m \mu_{ret} \pi(k, m) + M \mu_{ret} \sum_{k=0}^C \pi(k, Q), \\
 R_{r,s} &= \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q-1} m \mu_{ret} \pi(k, m) + M \mu_{ret} \sum_{k=0}^{C-1} \pi(k, Q), \\
 R_{r,f} &= \sum_{m=0}^{Q-1} m \mu_{ret} \pi(C, m) + M \mu_{ret} \pi(C, Q), \\
 R_{ab} &= P_i R_{r,f}.
 \end{aligned}$$

Los parámetros p y M pueden ser estimados del siguiente modo. A partir de los cortes verticales del diagrama de transiciones se obtiene el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\begin{aligned} \lambda(C, 0)\pi(C, 0) &= \mu_{ret} \sum_{k=0}^C \pi(k, 1) - \mu_{ret}\pi(C, 1) + \mu_{ret}P_i\pi(C, 1), \\ \lambda(C, 1)\pi(C, 1) &= 2\mu_{ret} \sum_{k=0}^C \pi(k, 2) - 2\mu_{ret}\pi(C, 2) + 2\mu_{ret}P_i\pi(C, 2), \\ &\dots \\ \lambda(C, Q-1)\pi(C, Q-1) &= M\mu_{ret}(1-p) \sum_{k=0}^C \pi(k, Q) - M\mu_{ret}(1-p)(1-P_i)\pi(C, Q). \end{aligned} \quad (3.1)$$

Cuya suma puede reescribirse del modo

$$\begin{aligned} [R_{1,f} - \lambda(C, Q)\pi(C, Q)] &= \left[R_{r,s} - M\mu_{ret} \sum_{k=0}^C \pi(k, Q) + M\mu_{ret}\pi(C, Q) \right] + \\ + [R_{ab} - M\mu_{ret}P_i\pi(C, Q)] &+ M\mu_{ret}(1-p) \sum_{k=0}^C \pi(k, Q) - M\mu_{ret}(1-p)(1-P_i)\pi(C, Q). \end{aligned}$$

Dado que todos los primeros accesos fallidos o bien reintentan con éxito o bien acaban abandonando el sistema, es decir, $R_{1,f} = R_{r,s} + R_{ab}$, se puede escribir

$$\lambda(C, Q)\pi(C, Q) = M\mu_{ret}p \sum_{k=0}^C \pi(k, Q) - M\mu_{ret}p(1-P_i)\pi(C, Q). \quad (3.2)$$

De las ecuaciones (3.1) y (3.2) se puede despejar p y M en función de las probabilidades de estado:

$$\begin{aligned} p &= \frac{\lambda(C, Q)\pi(C, Q)}{\lambda(C, Q-1)\pi(C, Q-1) + \lambda(C, Q)\pi(C, Q)}, \\ M &= \frac{\lambda(C, Q-1)\pi(C, Q-1) + \lambda(C, Q)\pi(C, Q)}{\mu_{ret}[\sum_{k=0}^{C-1} \pi(k, Q) + P_i\pi(C, Q)]}. \end{aligned}$$

Al existir una dependencia mutua entre las probabilidades de estado y p y M se debe seguir un proceso iterativo para calcularlos. Empezando con $p = 0$ y $M = Q$ se pueden calcular las probabilidades de estado en régimen permanente $\pi(k, m)$ y después los siguientes valores de p y M . El proceso se repite hasta que la precisión relativa del proceso sea inferior a, por ejemplo, 10^{-4} . En [MCL⁺01] se asume la convergencia de ese proceso iterativo. En el presente caso, se ha evaluado un amplio rango de escenarios con parámetros de configuración dispares, convergiendo el proceso en todos los casos.

3.2.3 Resultados numéricos

Para evaluar la técnica de resolución aproximada se ha escogido un modelo cuyos parámetros son: $U = 120$ usuarios, $C = 30$ servidores, $\mu^{-1} = 180$ segundos, $\mu_{ret}^{-1} = 10$ segundos y $P_i = 0.5$. Se define el tráfico ofrecido por cada usuario como $\rho = \lambda / (\lambda + \mu)$. Asimismo, se ha empleado el *algoritmo 0* de resolución descrito en [Ser02] para aprovechar la estructura tridiagonal a bloques del sistema y hacer una resolución más eficiente del mismo.

En la Fig. 3.4 se muestra el error relativo para diferentes parámetros de prestaciones para dos valores diferentes de Q definido como $|P_{xx}^{exacto} - P_{xx}^{aprox}| / P_{xx}^{exacto}$, $xx \in \{b, si, sr, ns\}$. El valor $Q = 1$ representa el algoritmo descrito en [MCL⁺01] mientras que $Q = 10$ representa un compromiso entre coste computacional y precisión. Los resultados muestran que la técnica propuesta en [MCL⁺01] supone una buena aproximación para el cálculo de P_b , pero no es en absoluto adecuada para el resto de parámetros. Se puede comprobar que el método FM es capaz de conseguir unos errores relativos despreciables para todos los parámetros de prestaciones con unos valores de Q relativamente bajos, y que el error puede disminuirse hasta el valor deseado tomando valores de Q superiores. Obviamente, conforme se tomen valores de Q superiores, el coste computacional crecerá. También se observa en la Fig. 3.4 que la precisión es función de la carga del sistema, dado que conforme la carga del sistema se incrementa, también lo hace el número de usuarios reintentando. Respecto a la reducción del espacio de estados, con

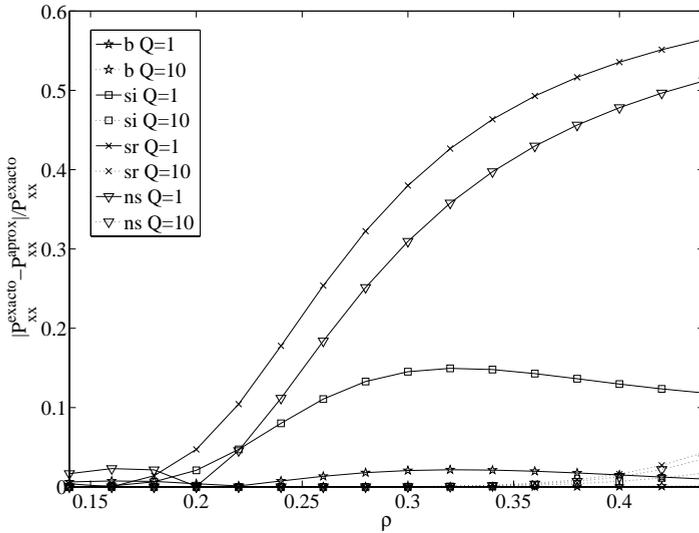


Figura 3.4: Error relativo del método FM.

$Q = 10$ se consigue una reducción del 90% mientras se obtiene un error relativo muy bajo. El ahorro en el coste computacional para sistemas con $\rho = 0.22$ ($P_b = 0.12$) es del 99.95% para $Q = 1$ y del 99.5% para $Q = 10$, ambos con respecto al modelo exacto. Finalmente, como primera aproximación para determinar un valor adecuado para Q , se podría tomar un valor alrededor de $Q \cong 0.15(U - C)$, independientemente de la carga del sistema, aunque probablemente valores inferiores serían suficientes. Se ha probado esta regla general en varias situaciones de interés práctico, encontrando que es una buena elección en todas ellas.

3.3 Los reintentos en sistemas móviles

Una vez planteado un método, al que se ha denominado FM, que se ha mostrado como útil para calcular con precisión los principales parámetros de

mérito propios de los sistemas con reintentos, es el momento de aplicarlo a diferentes sistemas que modelen redes celulares con mayor precisión. De este modo, se podrán resolver modelos analíticos que de otro modo serían intratables y, con ello, analizar el impacto que tienen los reintentos en estos tipos de redes celulares.

Se van a plantear dos escenarios celulares diferentes que, por su complejidad y hasta donde se tiene conocimiento, no han sido resueltos de forma analítica en la literatura publicada hasta la fecha. En ambos se considera un comportamiento que parece inevitable cuando hay seres humanos que tratan de acceder a un recurso: la persistencia en forma de reintentos cuando un usuario trata de acceder sin éxito al sistema o es expulsado del mismo. A diferencia del escenario que modela una red fija, en las redes móviles existen dos flujos de llegadas: peticiones nuevas y *handovers*. Ese hecho abre un abanico de posibilidades, de las cuales se han elegido las dos que parecen más lógicas desde el punto de vista de funcionamiento de las redes celulares. En ambas se ha considerado que los usuarios realizan remarcados únicamente cuando son bloqueados en su intento de acceder al sistema, y no al padecer un *handover* fallido. En un primer modelo, los *handovers* bloqueados se sitúan en una cola esperando a que hayan recursos libres para acceder al sistema y en un segundo modelo se considera que estos reintentan su acceso al sistema un tiempo después. Por tanto, a partir de este momento se va a hacer una distinción entre los reintentos de sesiones nuevas, a los que se denominará remarcados, y, cuando se consideren, los reintentos de *handovers*, a los que se denominará reintentos automáticos, por venir habitualmente generados por la red mientras el terminal no salga del área de solape entre células.

Sin embargo, ambos modelos estudiados tienen una serie de parámetros y características en común. Por una parte, se considera un sistema con una asignación de recursos del tipo FCA y cuya capacidad es fija con C unidades de recurso, dependiendo el significado físico de una unidad de recurso de la tecnología empleada en la interfaz radio. Sin pérdida de generalidad, se considera que una sesión ocupa una única unidad de recurso. Se ha considerado que la duración de las sesiones está distribuida exponencialmente con

tasa μ_s y que el tiempo de residencia en la célula también lo está con tasa μ_r . De este modo, el tiempo de ocupación de canal también estará distribuido exponencialmente con tasa $\mu = \mu_s + \mu_r$ y el número medio de *handovers* por sesión cuando el número de recursos es infinito es $N_H = \mu_r / \mu_s$. Por otra parte existen dos flujos de llegada, cuyo proceso agregado es $\lambda = \lambda_n + \lambda_h$. El primero de ellos, de tasa λ_n , representa la llegada de nuevas sesiones a la célula en estudio, mientras que el segundo, de tasa λ_h , representa el flujo de llegada de *handovers*. Por tratabilidad matemática se ha considerado que ambos procesos de llegada son de Poisson. El valor de λ_h se ha determinado de modo que el sistema está en equilibrio estadístico, es decir, la tasa de salida de *handovers* desde la célula en estudio es igual a la tasa con la que llegan sesiones desde las células vecinas. Por ese motivo, el valor de λ_h se ha evaluado numéricamente mediante una técnica de punto fijo. Para hacer esto, a partir de un valor de λ_h inicial, se resuelve el sistema y se calcula cuál es la tasa de *handovers* saliente, empleándose ese valor como parámetro de entrada en una nueva resolución del sistema. Este proceso se repite hasta que, por ejemplo, $|\lambda_h^i - \lambda_h^{i+1}| / \lambda_h^i < 10^{-4}$, siendo λ_h^i y λ_h^{i+1} dos valores de λ_h calculados en iteraciones consecutivas.

Como política CAS se ha considerado una política FGC, la cual se caracteriza por un único parámetro t ($0 \leq t \leq C$). Las peticiones de sesiones nuevas y los remarcados se aceptan con probabilidad 1 mientras hayan menos de $L = \lfloor t \rfloor$ recursos en uso y con probabilidad $f = t - L$, cuando hay exactamente L recursos en uso. Si hay más de L recursos ocupados, no se aceptan las nuevas sesiones ni los remarcados. Por otra parte, los *handovers* se aceptan mientras hayan recursos disponibles.

3.3.1 Encolado de los *handovers*

La utilización de una cola para situar los *handovers* bloqueados ha sido una técnica empleada en redes celulares con el objetivo de minimizar la probabilidad de terminación forzosa y, de este modo, priorizar los *handovers* sobre las peticiones de sesión nuevas, tal y como se hace en [PG85, HR86, LMN94,

KN96, TRV98]. Este encolado es transparente al usuario, ya que este continuará siendo servido por la célula origen del *handover*. Sin embargo, existirá un tiempo máximo en el que la sesión podrá estar esperando en la cola a ser servida, siendo ese tiempo el que permanece el terminal en el área de solape entre células. Así, si el terminal abandona el área de solape hacia la célula destino antes de haberse cursado el *handover*, la sesión terminará abruptamente. Habitualmente, se ha considerado que la disciplina de servicio para la cola de *handovers* bloqueados es del tipo FIFO [HR86, PCG02b, GGDBMB⁺05], aunque también se han considerado disciplinas de servicio más complejas que priorizan las sesiones cuyo tiempo de permanencia en el área de solape es inferior [TJ91, TJ92, ET99, RFG99a, RFG99b, Fan00, XT04].

Descripción del modelo

Como se observa en la Fig. 3.5, el modelo considerado en esta sección considera una órbita de remarcados para las sesiones nuevas bloqueadas y una cola para los *handovers* que no pueden cursarse con éxito. Para los remarcados, se ha considerado que cuando una petición de establecimiento de una nueva sesión es bloqueada, el usuario realiza por lo menos un remarcado. En el caso de bloqueos sucesivos, el usuario remarcará con probabilidad $(1 - P_{in})$ y abandonará con la probabilidad complementaria. El tiempo entre intentos de acceso se ha considerado distribuido exponencialmente con tasa μ_{red} . Para las sesiones de *handover* bloqueadas, se considera que estas pueden ser retrasadas mientras el terminal permanezca en el área de solape entre células. Se ha modelado ese hecho incorporando una cola FIFO de capacidad Θ y se ha considerado que el tiempo máximo en el que el terminal permanece en el área de solape está distribuido exponencialmente con tasa μ'_r . Por lo tanto, el tiempo máximo que puede estar encolado un *handover* también estará distribuido exponencialmente con tasa $\gamma = \mu_s + \mu'_r$. Finalmente, cuando se libera un recurso debido a que una sesión acaba o sale de la célula, ese recurso se asigna al primer *handover* que exista en cola.

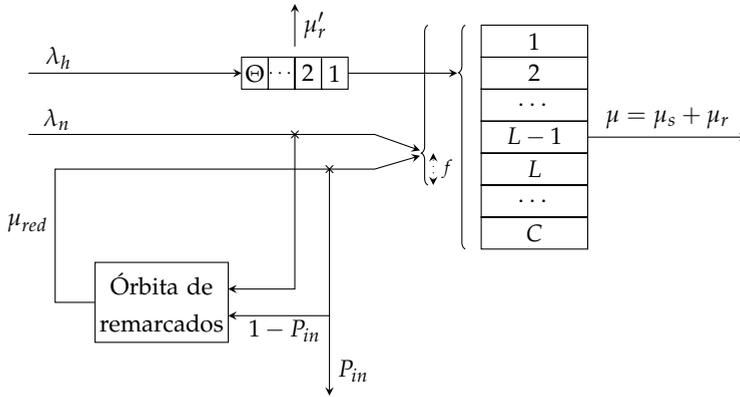


Figura 3.5: Sistema celular con remarcados y encolado de *handovers*.

Resolución del sistema

Para resolver el sistema propuesto, se va a aplicar la filosofía del método FM, particularizándolo al problema que nos ocupa. El sistema propuesto puede modelarse como un proceso QBD con un espacio de estados dado por

$$\mathcal{S} := \{(k, m) : 0 \leq k \leq C + \Theta; \quad 0 \leq m \leq Q\},$$

donde k es el número de servidores ocupados más el número de *handovers* en cola esperando a ser servidos y m es el número de usuarios en la órbita de remarcados tratando de acceder al sistema cuando $m < Q$. Los estados (k, Q) representan la situación en la que hay Q o más usuarios remarcando.

La Fig. 3.6 muestra el diagrama de transiciones del modelo propuesto, siendo $\alpha = M\mu_{red}(1 - p)$ y $\beta = M\mu_{red}p$. Como se puede observar, se han introducido dos nuevos parámetros: M y p . El parámetro M representa el número medio de usuarios remarcando cuando hay por lo menos Q usuarios en la órbita de remarcados y p es la probabilidad de que después de un remarcado con éxito el número de usuarios remarcando sea igual o superior a Q .

De forma análoga a como se hizo en los sistemas fijos, se pueden definir

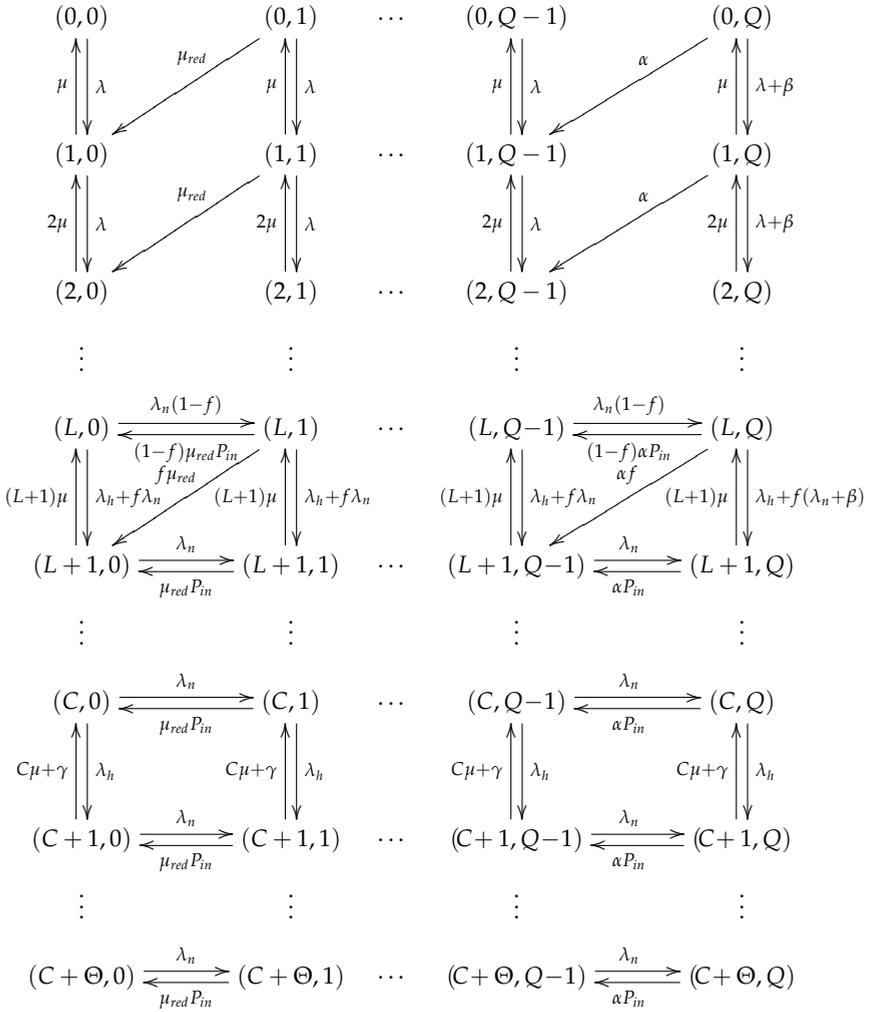


Figura 3.6: Diagrama de transiciones del sistema con encolado de *handovers* para la técnica FM.

Tabla 3.1: Tasas asociadas al sistema celular con encolado de *handovers*.

Tasa	Valor
$(R_o)_n$	$\lambda_n \sum_{k=0}^{C+\Theta} \sum_{m=0}^Q \pi(k, m) = \lambda_n$
$(R_{1,s})_n$	$\lambda_n \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{m=0}^Q \pi(k, m) + \lambda_n f \sum_{m=0}^Q \pi(L, m)$
$(R_{1,f})_n$	$\lambda_n(1-f) \sum_{m=0}^Q \pi(L, m) + \lambda_n \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \sum_{m=0}^Q \pi(k, m)$
$(R_r)_n$	$\mu_{red} \sum_{k=0}^{C+\Theta} \sum_{m=0}^{Q-1} m\pi(k, m) + M\mu_{red} \sum_{k=0}^{C+\Theta} \pi(k, Q)$
$(R_{r,s})_n$	$\mu_{red} \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{Q-1} m\pi(k, m) + \mu_{red} f \sum_{m=0}^{Q-1} m\pi(L, m) +$ $+M\mu_{red} \sum_{k=0}^{L-1} \pi(k, Q) + M\mu_{red} f \pi(L, Q)$
$(R_{r,f})_n$	$\mu_{red} \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \sum_{m=0}^{Q-1} m\pi(k, m) + \mu_{red}(1-f) \sum_{m=0}^{Q-1} m\pi(L, m) +$ $+M\mu_{red} \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k, Q) + M\mu_{red}(1-f)\pi(L, Q)$
$(R_{ab})_n$	$P_{in}(R_{r,f})_n$

un conjunto de tasas que permitan calcular de un modo más intuitivo las probabilidades de servicio inmediato, retardado y de no servicio. El valor de estas tasas para las sesiones nuevas se detalla en la Tabla 3.1.

Para calcular las expresiones que relacionan los parámetros M y p con las probabilidades de estado se parte de las ecuaciones de balance de flujo en los cortes verticales del diagrama de transiciones y de la igualdad $(R_{1,f})_n = (R_{r,s})_n + (R_{ab})_n$. El proceso para este cálculo puede encontrarse en el Apéndice B.1.1, y el resultado es:

$$p = \frac{(1-f)\pi(L, Q) + \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k, Q)}{(1-f)[\pi(L, Q) + \pi(L, Q-1)] + \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} [\pi(k, Q) + \pi(k, Q-1)]'}$$

$$M = \frac{\lambda_n[(1-f)[\pi(L, Q) + \pi(L, Q-1)] + \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} [\pi(k, Q) + \pi(k, Q-1)]}{\mu_{red}[\sum_{k=0}^{L-1} \pi(k, Q) + (1-f)P_{in}\pi(L, Q) + f\pi(L, Q) + P_{in} \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k, Q)]}$$

Tal y como se observa en la Fig. 3.6, sólo existen transiciones entre estados del mismo nivel o niveles adyacentes, por lo que el generador infinitesimal \mathbf{Q} tiene la siguiente estructura tridiagonal por bloques de tamaño $(Q+1) \times (Q+1)$:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0^0 & \mathbf{v}_0^+ & \dots & 0 & 0 \\ \mathbf{v}_1^- & \mathbf{v}_1^0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{v}_2^- & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{v}_{C+\Theta-2}^+ & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{v}_{C+\Theta-1}^0 & \mathbf{v}_{C+\Theta-1}^+ \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{v}_{C+\Theta}^- & \mathbf{v}_{C+\Theta}^0 \end{bmatrix}.$$

El valor de las matrices \mathbf{v}_k^+ , \mathbf{v}_k^- y \mathbf{v}_k^0 así como su interpretación se puede encontrar en el Apéndice B.1.2.

Las probabilidades de estado de este sistema pueden obtenerse mediante la resolución del sistema $\pi\mathbf{Q} = \mathbf{0}$ junto con la condición de normalización $\pi\mathbf{e} = \mathbf{1}$. Como \mathbf{Q} es una matriz de tamaño finito, se puede resolver el sistema por cualquiera de los métodos del álgebra lineal clásica existentes para este propósito. Sin embargo, se puede aprovechar la estructura tridiagonal para emplear algún mecanismo más eficiente como el descrito en [Ser02]. Al igual que se hacía en la sección 3.2, como existe una dependencia entre las probabilidades de estado y p y M se debe seguir un proceso iterativo para calcularlos, empezando con $p = 0$ y $M = Q$. En todos los casos, se ha repetido el proceso hasta que la precisión relativa del proceso sea inferior a 10^{-4} .

Una vez se han calculado las probabilidades de estado del sistema, se pueden calcular los diferentes parámetros de mérito que definen el sistema. Para las sesiones nuevas, se tiene:

- Probabilidad de bloqueo de sesiones nuevas (P_b^n):

$$P_b^n = \sum_{m=0}^Q (1-f)\pi(L, m) + \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \sum_{m=0}^Q \pi(k, m).$$

- Probabilidad de que una nueva sesión se sirva en su primer acceso al sistema (P_{si}^n):

$$P_{si}^n = \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{m=0}^Q \pi(k, m) + f \sum_{m=0}^Q \pi(L, m).$$

- Probabilidad de obtener servicio, pero no en el primer acceso (P_{sr}^n):

$$P_{sr}^n = \lambda_n^{-1} \mu_{red} \left[\sum_{k=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{Q-1} m\pi(k, m) + M \sum_{k=0}^{L-1} \pi(k, Q) + f \left[\sum_{m=0}^{Q-1} m\pi(L, m) + M\pi(L, Q) \right] \right].$$

- Probabilidad de que un usuario abandone el sistema sin haber sido servido (P_{ns}^n):

$$P_{ns}^n = \lambda_n^{-1} \mu_{red} P_{in} \left[\sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \sum_{m=0}^{Q-1} m\pi(k, m) + M \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k, Q) + (1-f) \left[\sum_{m=0}^{Q-1} m\pi(L, m) + M\pi(L, Q) \right] \right].$$

Los principales parámetros de prestaciones que definen a los *handovers* son:

- Probabilidad de bloqueo de *handovers* debido a que la cola esté llena (P_b^h):

$$P_b^h = \sum_{m=0}^Q \pi(C + \Theta, m).$$

- Probabilidad de que un *handover* abandone la cola por impaciencia (P_{ab}^h):

$$P_{ab}^h = \frac{\mu'_r}{\lambda_h} \sum_{k=C+1}^{C+\Theta} \sum_{m=0}^Q (k-C)\pi(k,m).$$

- Probabilidad de terminación forzosa (P_{tf}^h), teniendo en cuenta tanto la posibilidad de que se abandone por impaciencia como de encontrar la cola llena:

$$P_{tf}^h = \frac{\frac{\mu_r}{\mu_s} [P_b^h + P_{ab}^h]}{1 + \frac{\mu_r}{\mu_s} [P_b^h + P_{ab}^h]}.$$

Resultados numéricos

Para el modelo planteado y con la técnica de resolución propuesta se va a evaluar el impacto que tienen diferentes características del sistema en sus prestaciones. En todos los ejemplos numéricos se han usado los siguientes valores por defecto, que no se modifican a menos que se indique lo contrario. La capacidad del sistema es de $C = 32$ servidores con un umbral para la política FGC de $t = 31$ y una longitud máxima de la cola de *handovers* de $\Theta = 1$. El tiempo de residencia y el de duración de las sesiones satisfacen: $\mu_r/\mu_s = 2$ y $\mu_r + \mu_s = 1$. Para determinar el tiempo medio de residencia en el área de solape se usa $\mu'_r/\mu_r = 10$. Para los remarcados, se ha tomado $P_{in} = 0.2$ y $\mu_{red} = 50 \text{ s}^{-1}$. La Fig. 3.7 muestra la evolución del error de diferentes parámetros de prestaciones conforme se aumenta el valor Q para dos cargas del sistema diferentes, $\lambda_n = 8 \text{ s}^{-1}$ y $\lambda_n = 12 \text{ s}^{-1}$. El error se ha cuantificado como el cociente $Prob(Q)/Prob(exacto)$, siendo $Prob$ uno de los elementos del conjunto $\{P_{si}^n, P_{sr}^n, P_{ns}^n, P_b^n\}$, y siendo $P_b^n = P_{sr}^n + P_{ns}^n$. $Prob(exacto)$ corresponde con el valor exacto y $Prob(Q)$ es el valor obtenido para un determinado valor de Q . Obviamente, puesto que se desconoce el valor exacto, hay que tomar un valor aproximado del mismo. Para ello, se ha ido incrementando el valor de Q hasta que todos los parámetros se han estabilizado hasta el 14º decimal. A partir de los resultados de la Fig. 3.7 se determina la configuración del método que se va a usar para evaluar el presente modelo: $Q = 6$. Se va a emplear

este valor puesto que proporciona un buen balance entre precisión y coste computacional. En cualquier caso, y aunque $Q = 6$ sea una elección conservadora, se recomienda el uso de valores de Q superiores cuando exista un elevado número de usuarios en la órbita de reintentos si se quieren calcular los parámetros de mérito de forma muy precisa.

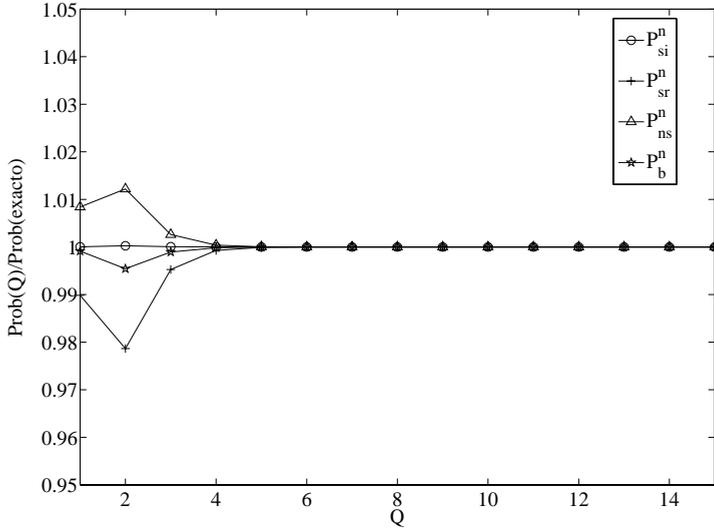
Evaluación del modelo:

En esta sección se pretende ilustrar el impacto que tienen los remarcados en la calidad de servicio percibida por los usuarios. La Fig. 3.8(a) muestra el comportamiento que tiene la probabilidad de bloqueo de sesiones nuevas P_b^n con la tasa de llegada de nuevas sesiones. Como cabe esperar, conforme λ_n aumenta, también lo hace la probabilidad de bloqueo. Nótese también que la probabilidad de bloqueo aumenta conforme P_{in} disminuye debido a que menos usuarios abandonan el sistema por impaciencia. Conclusiones similares pueden alcanzarse para P_{tf}^h en la Fig. 3.8(b).

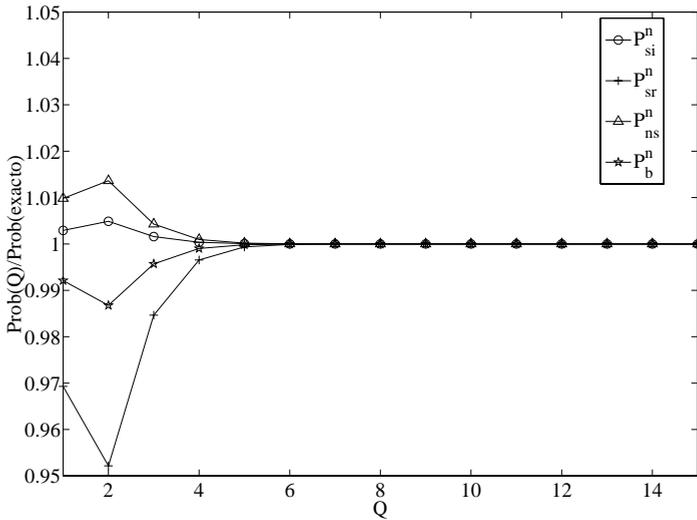
Se ha definido $\eta = (\lambda_n + \lambda_{red}) / \lambda_n$ como el número medio de peticiones de acceso por cada nueva sesión, donde $\lambda_{red} = N_{red}\mu_{red}$ es la tasa media de llegadas correspondientes a remarcados, siendo N_{red} el número medio de usuarios en la órbita de remarcados. La Fig. 3.9(a) muestra el valor de η conforme crece λ_n . Está claro que conforme P_{in} disminuye, el número medio de accesos crece, pero debe notarse el salto drástico que ocurre cuando se pasa de $P_{in} = 0.1$ a $P_{in} = 0$. Obviamente, η también crece conforme lo hace λ_n . Por otra parte, la Fig. 3.9(b) muestra la evolución de P_{si}^n , P_{sr}^n y P_{ns}^n para un valor típico de $P_{in} = 0.2$.

Impacto de la cola de *handovers*:

Se van a realizar dos estudios diferentes para analizar el impacto que tiene la longitud máxima de la cola de *handovers* en las prestaciones del sistema. En primer lugar en la Fig. 3.10(a) se muestra el impacto de Θ en el proceso de dimensionado. Este proceso consiste en calcular el número mínimo de unidades de recurso (C) y el umbral de la política FGC (t) para una determinada

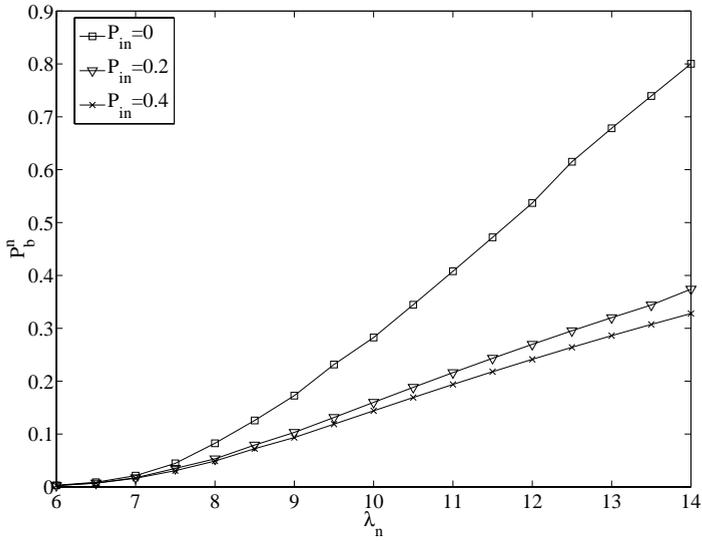


(a) $\lambda_n = 8$.

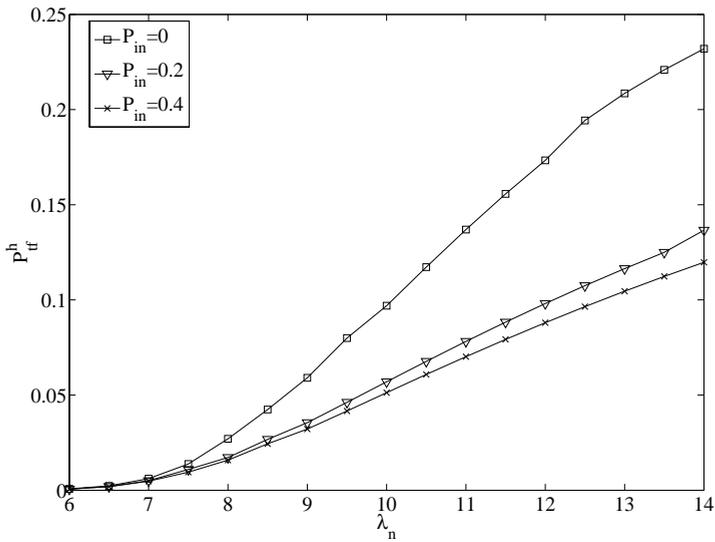


(b) $\lambda_n = 12$.

Figura 3.7: Impacto del método FM en el sistema celular con encolado de *handovers*.

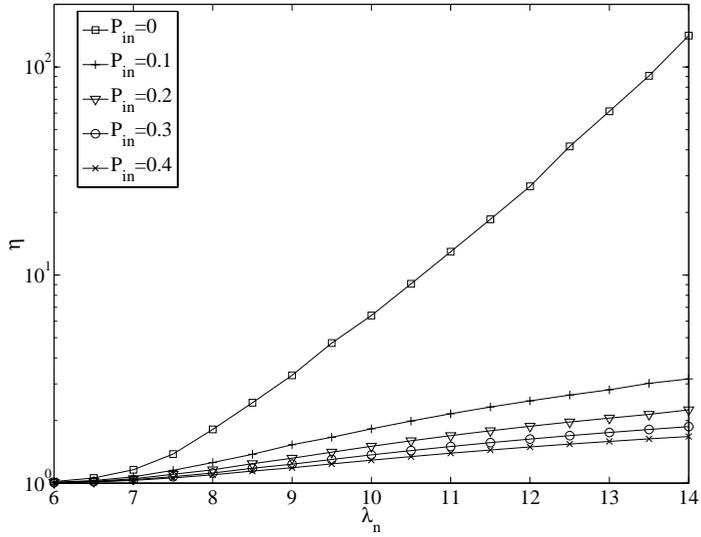


(a) Probabilidad de bloqueo de sesiones nuevas.

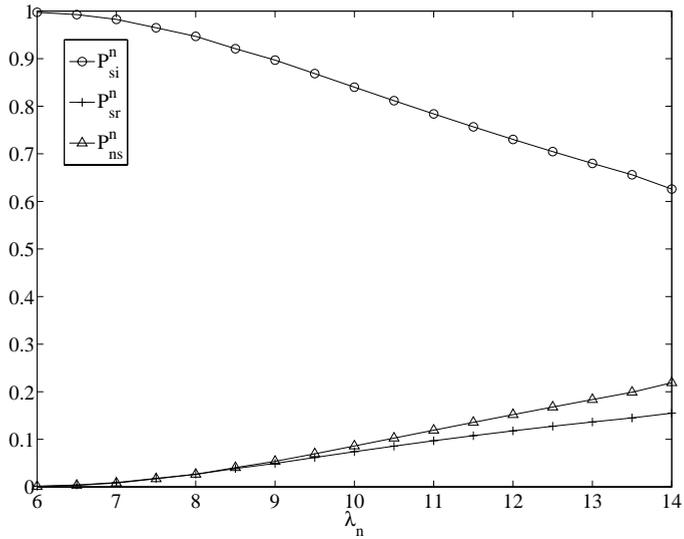


(b) Probabilidad de terminación forzosa.

Figura 3.8: Evaluación del sistema celular con encolado de *handovers* (I).



(a) Número medio de peticiones de acceso por sesión nueva.



(b) Probabilidades de servicio inmediato, retardado y de no servicio. $P_{in} = 0.2$.

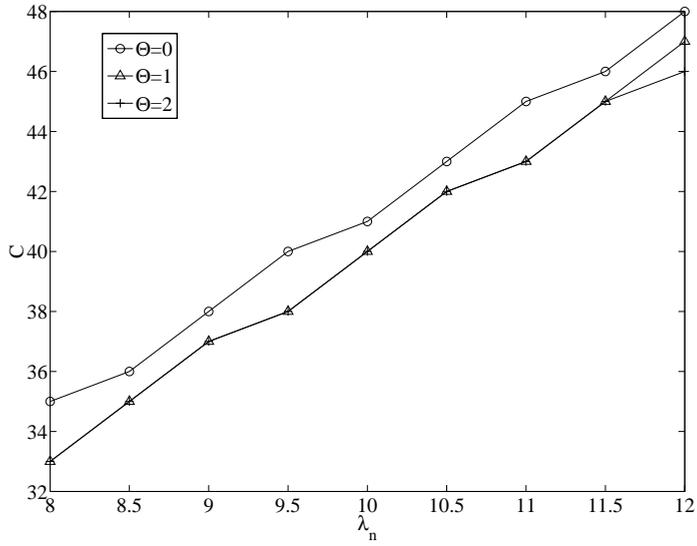
Figura 3.9: Evaluación del sistema celular con encolado de *handovers* (II).

λ_n , con el objetivo de garantizar que $P_b^n \leq 0.05$ y $P_b^h \leq 0.005$. Como cabe esperar, se requieren mayores valores de C para acomodar mayores cargas del sistema y garantizar unas cotas de QoS. Nótese el efecto positivo que tiene el uso de una cola ($\Theta > 0$) para peticiones de *handover* ya que se requerirán menos recursos para garantizar las mismas cotas de QoS. Nótese también que el disponer de unas pocas posiciones para la cola es suficiente para notar el beneficio y que disponer de un número mayor no tiene ningún impacto.

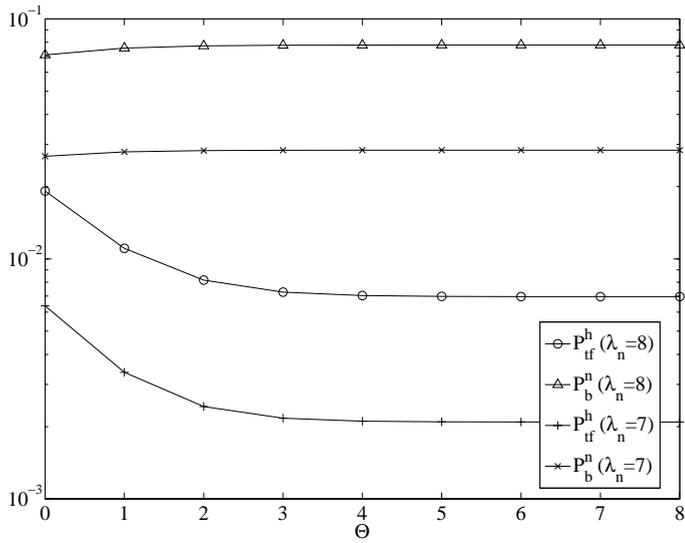
En segundo lugar, en la Fig. 3.10(b) se muestra el impacto de la longitud de la cola de *handovers* en la probabilidad de bloqueo de sesiones nuevas y de terminación forzosa. Como puede apreciarse, el incremento de Θ tiene una influencia positiva en P_{if}^h . Como cabía esperar, el incremento de la longitud de la cola tiene un efecto negativo sobre P_b^n , aunque la figura muestra que su magnitud es despreciable. Como en el caso anterior, se observa como pequeños valores de Θ son suficientes para beneficiarnos de la reducción en P_{if}^h , y valores mayores no tienen impacto.

Impacto de la política FGC:

En esta sección se va a analizar el impacto que tiene la configuración de la política FGC en las prestaciones del sistema. Para ello se va a emplear un proceso de dimensionado similar al ya descrito, pero únicamente para t . Básicamente, se determina el valor de t que consiga el mínimo valor de P_b^n y que garantice $P_b^h \leq 0.005$. La Fig. 3.11(a) muestra el valor de t óptimo que satisface el objetivo de QoS definido, mientras que la Fig. 3.11(b) muestra la variación de P_b^n y P_b^h con la tasa de llegadas cuando se emplea el valor óptimo de t . En ambas figuras se muestran los resultados cuando se reserva un número fraccional de canales (FGC) y un número entero (GC). Se puede observar que conforme la carga del sistema se incrementa el valor de t requerido disminuye para satisfacer la P_b^h objetivo. Esto a su vez disminuye el número medio de recursos a los que las nuevas sesiones tienen acceso, incrementándose de este modo P_b^n . Nótese que cuando se emplea un número de canales fraccional el objetivo se alcanza con mayor precisión, tal y como se demuestra en [RTN97].

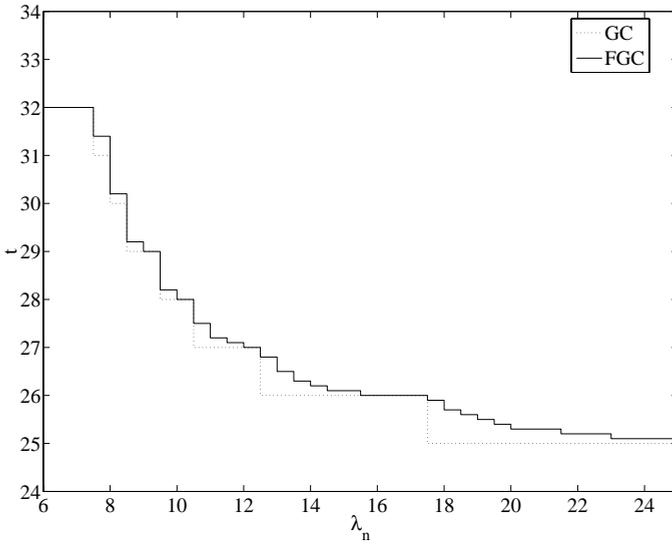


(a) En el proceso de dimensionado.

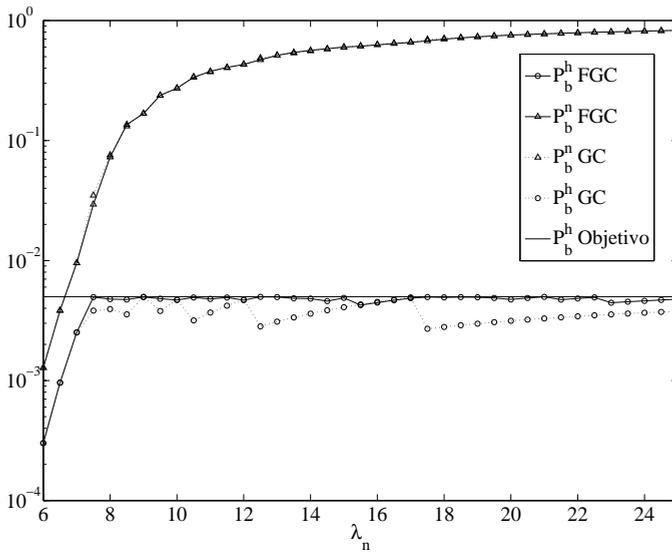


(b) En la probabilidad de bloqueo y terminación forzosa.

Figura 3.10: Impacto de la longitud de la cola para *handovers* (Θ).



(a) Valor óptimo de t para garantizar $P_b^h \leq 0.005$.



(b) Variación de P_b^n y P_b^h usando el valor óptimo de t .

Figura 3.11: Impacto de la configuración FGC en el sistema celular con encendido de *handovers*.

Redimensionado con remarcados:

Habitualmente se asume que si el fenómeno de los remarcados se ignora durante la fase de planificación de una red celular, puede ocurrir un sobredimensionado, básicamente debido a la carga extra que representan los remarcados. En esta sección se trata de evaluar la magnitud de ese sobredimensionado. Para ello, se va a dimensionar el sistema en dos escenarios. En el primero de ellos la carga extra que añaden los remarcados se toma siguiendo el modelo empleado hasta el momento. Sin embargo, en el segundo escenario la carga que introducen los remarcados se considera como un incremento en la tasa de llegada de sesiones nuevas, es decir, un sistema que no considera remarcados y tiene una tasa de llegadas de valor $\lambda'_n = \lambda_n + \lambda_{red}$. Nótese que este segundo modelo es el que consideran los operadores de redes celulares, ya que en la estimación del tráfico que trata de acceder a la red habitualmente no distinguen los intentos de acceso nuevos de los que son de usuarios que están remarcando.

De acuerdo con el modelo planteado, el primer paso consiste en obtener la tasa de remarcados (λ_{red}) para cada tasa de llegada de sesiones nuevas en el escenario que considera remarcados. Para que los *handovers* no alteren las medidas, se ha empleado la misma tasa de llegada de *handovers* para ambos escenarios, más concretamente la tasa de *handovers* calculada en la resolución del modelo que considera los remarcados. Entonces se determina el número de recursos necesarios (C) y valor óptimo de t para garantizar $P_b^n \leq 0.05$ y $P_b^h \leq 0.005$.

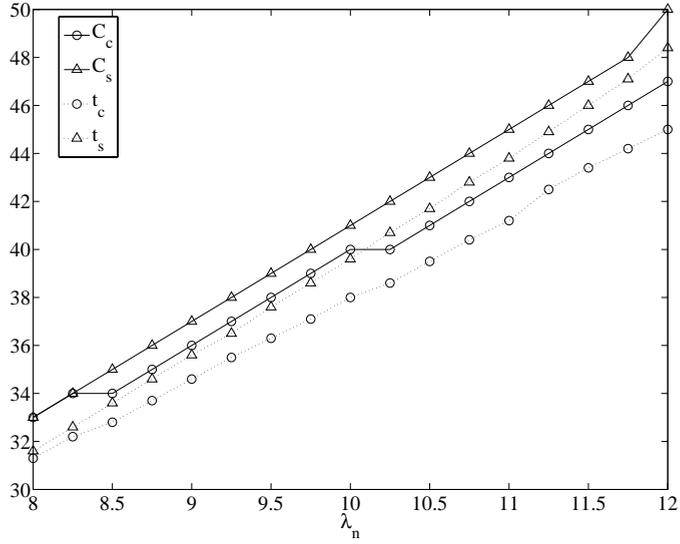
La Fig. 3.12 muestra el resultado del proceso de dimensionado en los dos escenarios descritos para $P_{in} = 0.2$ y $P_{in} = 0$. C_c y t_c son el número de recursos y configuración de la política FGC óptimos para el modelo que considera los remarcados y C_s y t_s los análogos para el modelo que considera los remarcados como un incremento en el número de sesiones nuevas. Como se observa en la Fig. 3.12, el número de recursos requeridos se incrementa conforme aumenta la carga en ambos escenarios, para poder satisfacer los requisitos de QoS. Sin embargo, percibir los remarcados como un incremento en la tasa de llegada de nuevas sesiones nos conduce a un severo sobredimensionado, es-

pecialmente cuando $P_{in} = 0$. Aunque el escenario con $P_{in} = 0$ podría parecer exagerado, los terminales móviles pueden estar equipados con remarcación automática [ODEa02], por lo que el número de remarcados puede llegar a ser alto debido tanto a la remarcación automática como a la iniciada por el usuario.

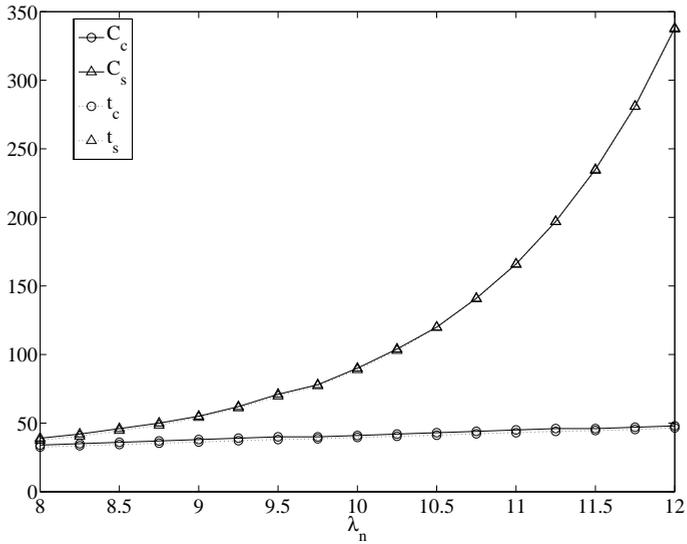
3.3.2 Reintentos automáticos de los *handovers*

En esta sección se consideran de forma simultánea tanto los reintentos automáticos³ debido a los *handovers* que no pueden completarse con éxito como los remarcados debidos a los bloqueos de las sesiones nuevas. Existen diferencias importantes entre ambos tipos de reintentos que hacen que no se puedan tratar de un modo conjunto. Por un lado, los *handovers* bloqueados reintentan automáticamente hasta que se tenga éxito o bien el terminal salga del área de solape entre células. En el primer caso, la sesión continúa sin ningún tipo de interrupción, mientras que en el último caso la sesión termina abruptamente. Por contra, la persistencia de los remarcados depende de la impaciencia del usuario en particular y un abandono resulta en un fallo en el establecimiento de una nueva sesión, lo cual es menos molesto que la terminación abrupta de una sesión en curso por el fallo de un *handover*. Además, los reintentos automáticos tienen un carácter más determinista [CGK97, ODEa02] que los remarcados, que están determinados por la aleatoriedad del comportamiento humano. Por otra parte, el disponer de políticas CAS hace que habitualmente los remarcados y los reintentos automáticos no reciban la misma prioridad por parte de la red. Por estos motivos, desde el punto de perspectiva del modelado, ambos tipos de reintentos necesitan ser considerados de forma separada, dando lugar a dos órbitas de reintentos diferentes.

³Nótese que el término *reintento*, cuando no venga acompañado del término "automático", englobará tanto a los remarcados como a los reintentos automáticos.



(a) $P_{in} = 0.2$



(b) $P_{in} = 0.0$

Figura 3.12: Redimensionado de recursos en redes celulares con encolado de *handovers*.

Descripción del modelo

El modelo considerado en esta sección, tal y como se muestra en la Fig. 3.13, consta de dos órbitas de reintentos. Cuando se bloquea una sesión nueva pasa a formar parte de la órbita de remarcados con probabilidad $(1 - P_{in}^1)$ o abandona el sistema con la probabilidad complementaria. Si falla un remarcado, la sesión vuelve a la órbita de remarcados con probabilidad $(1 - P_{in})$, remarcando después de un tiempo distribuido exponencialmente con tasa μ_{red} . Desde el punto de vista de la política CAS, los remarcados son capaces de acceder a la misma cantidad de recursos que los accesos nuevos.

De forma similar, P_{ih}^1 , P_{ih} y μ_{ret} son los parámetros análogos para los reintentos automáticos. Haciendo $P_{ih}^1 = 0$, por lo menos se efectuará un reintento automático cuando el primer intento de ejecutar un *handover* sea fallido. En ese caso, si el sistema estuviera tan sobrecargado que la probabilidad de efectuar un reintento automático con éxito pudiera considerarse despreciable, el tiempo transcurrido desde el primer intento de *handover* hasta que el sistema finalmente abandona y se termina abruptamente la sesión será la suma de X variables aleatorias iid de media μ_{ret}^{-1} . En el modelo estudiado, la variable aleatoria X sigue una distribución geométrica de media $1/P_{ih}$, de ahí que el tiempo total desde el primer intento hasta el abandono viene descrito por una variable aleatoria distribuida exponencialmente con tasa $\mu'_r = \mu_{ret}P_{ih}$. De este modo, el modelo propuesto representa una situación en la que las peticiones de *handover* reintentan su acceso mientras el usuario permanezca en el área de solape, estando el tiempo de residencia de esa zona determinado por la variable aleatoria exponencial de tasa μ'_r . Aunque en [RGS98, PCG02a] se concluye que el tiempo de residencia en esa zona no es exponencial, en [PCG02b] se muestra que supone una buena aproximación.

Resolución del sistema

El modelo considerado puede representarse como una cadena de Markov continua en el tiempo (*Continuous Time Markov Chain*, CTMC) tridimensional

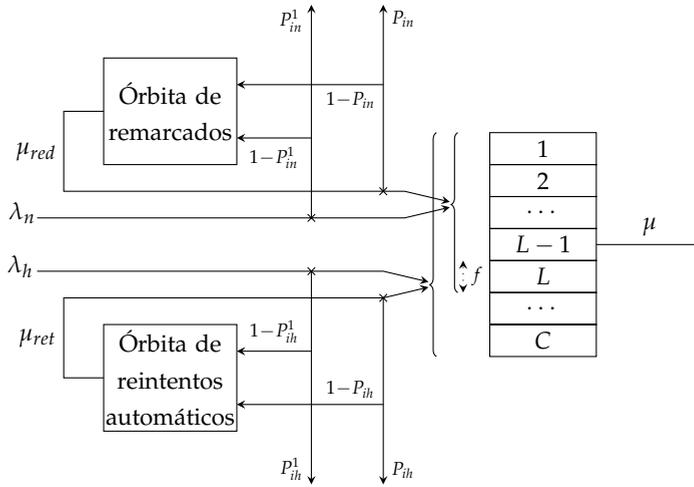


Figura 3.13: Modelo del sistema con reintentos y reintentos automáticos.

(k, m, s) , siendo la primera dimensión (k) el número de sesiones en curso, la segunda (m) el número de sesiones en la órbita de reintentos y la tercera dimensión (s) el número de sesiones en la órbita de reintentos automáticos. Las transiciones de este modelo se muestran en la Tabla 3.2. Además, en la Fig. 3.14 se observa el diagrama de transiciones de este modelo. Las principales características de este modelo son el hecho de tener dos dimensiones infinitas (el espacio de estados es $\{0, \dots, C\} \times \mathbb{Z}_+ \times \mathbb{Z}_+$) y la no homogeneidad en ellas.

La teoría de colas clásica (véase, por ejemplo, [Neu81, LR99]) está desarrollada para paseos aleatorios en $\{0, \dots, C\} \times \mathbb{Z}_+$ con transiciones sujetas a condiciones de homogeneidad. Cuando no existe tal homogeneidad el problema del cálculo de las probabilidades de estado se traslada al del desarrollo de técnicas que nos permitan resolver estos modelos de forma aproximada. De hecho, la dificultad aumenta cuando tenemos dos órbitas con estas características, como es el problema que nos ocupa. Por lo tanto, se va a hacer uso de la técnica FM para resolver de modo aproximado el sistema propuesto.

Tabla 3.2: Tasas de transición del modelo con dos órbitas de reintentos.

Transición	Condición	Tasa
$(k, m, s) \rightarrow (k + 1, m, s)$	$0 \leq k \leq L - 1$	λ
	$k = L$	$\lambda_h + f\lambda_n$
	$L < k \leq C$	λ_h
$(k, m, s) \rightarrow (k + 1, m, s - 1)$	$0 \leq k \leq C - 1$	$s\mu_{ret}$
$(k, m, s) \rightarrow (k, m, s - 1)$	$k = C$	$s\mu_{ret}P_{ih}$
$(k, m, s) \rightarrow (k + 1, m - 1, s)$	$0 \leq k \leq L - 1$	$m\mu_{red}$
	$k = L$	$m\mu_{red}f$
$(k, m, s) \rightarrow (k, m - 1, s)$	$k = L$	$m\mu_{red}(1 - f)P_{in}$
	$L < k \leq C$	$m\mu_{red}P_{in}$
$(k, m, s) \rightarrow (k - 1, m, s)$	$1 \leq k \leq C$	$k\mu$
$(k, m, s) \rightarrow (k, m, s + 1)$	$k = C$	$\lambda_h(1 - P_{ih}^1)$
$(k, m, s) \rightarrow (k, m + 1, s)$	$k = L$	$\lambda_n(1 - P_{in}^1)(1 - f)$
	$L < k \leq C$	$\lambda_n(1 - P_{in}^1)$

El método FM puede aplicarse a ambas órbitas de reintentos, reduciendo el espacio de estados a un conjunto finito agregando todos los estados que hay más allá de una determinada ocupación de las órbitas. Así, Q_n (Q_h) define el nivel de ocupación de la órbita de remarcados (reintentos automáticos) a partir del cual se agregan los estados. Incrementando los valores de Q_n y/o Q_h el espacio de estados resultante se incrementa y la precisión de los resultados también lo hace, a expensas de un mayor coste computacional. Debido a esa agregación dos nuevos parámetros se introducen para cada órbita. El parámetro M_n denota el número medio de usuarios en la órbita de remarcados condicionado a esos estados en los que hay por lo menos Q_n usuarios en la órbita, es decir, $M_n = E(m|m \geq Q_n)$. La probabilidad de que después de un remarcado con éxito el número de usuarios en la órbita no esté por debajo de Q_n se representa mediante p_n . Para la órbita de reintentos automáticos

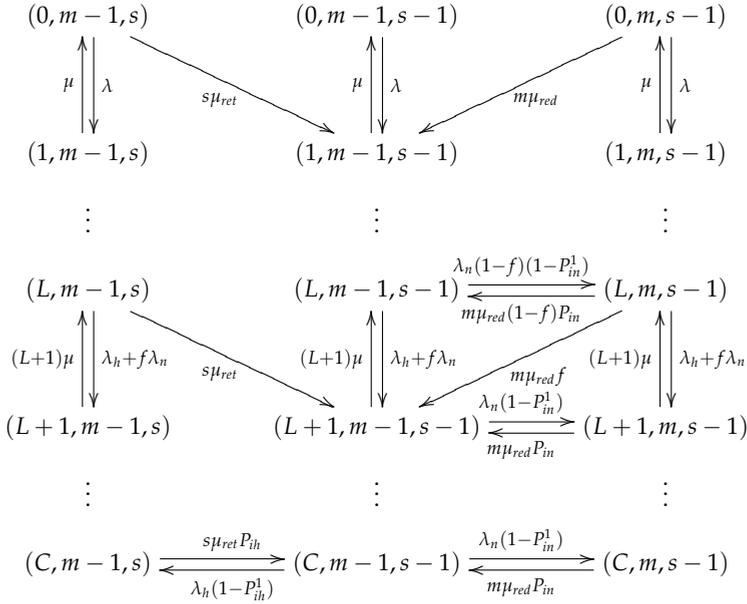


Figura 3.14: Diagrama de transiciones del modelo con dos órbitas de reintentos.

los parámetros M_h y p_h se definen de modo análogo. Como resultado de la agregación, el nuevo espacio de estados del modelo aproximado es

$$S = \{(k, m, s) : 0 \leq k \leq C; \quad 0 \leq m \leq Q_n; \quad 0 \leq s \leq Q_h\},$$

donde los estados de la forma (\cdot, Q_n, \cdot) representan la situación donde hay al menos Q_n usuarios en la órbita de remarcados. Por otra parte, los estados (\cdot, \cdot, Q_h) representan la situación donde hay por lo menos Q_h usuarios en la órbita de reintentos automáticos.

Las tasas de transición para el modelo aproximado se muestran en la Tabla 3.3. El generador infinitesimal asociado, \mathbf{Q} , para el modelo analítico propuesto tiene la siguiente estructura tridiagonal a bloques, siendo el tamaño de cada bloque $(Q_n + 1)(Q_h + 1) \times (Q_n + 1)(Q_h + 1)$:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0^0 & \mathbf{v}_0^+ & \dots & 0 & 0 \\ \mathbf{v}_1^- & \mathbf{v}_1^0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{v}_{C-1}^0 & \mathbf{v}_{C-1}^+ \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{v}_C^- & \mathbf{v}_C^0 \end{bmatrix}.$$

Las matrices \mathbf{v} definen las diferentes transiciones entre bloques, siendo \mathbf{v}^+ las matrices que definen las transiciones $k \rightarrow k + 1$ usuarios en el sistema, \mathbf{v}^- las matrices que definen las transiciones $k \rightarrow k - 1$, y \mathbf{v}^0 definen las transiciones entre estados con el mismo número de usuarios en los servidores. El valor de estas matrices puede encontrarse en el Apéndice B.2.1.

Para calcular las probabilidades de estado en régimen permanente del sistema ($\pi(k, m, s)$) se necesita conocer el valor de los parámetros M_n , p_n , M_h y p_h . A partir de los cortes verticales y horizontales del diagrama de transiciones y sabiendo que la tasa de nuevas sesiones que reintentan es igual a la suma de las tasas de reintentos exitosos y abandonos ($R_{1,f}(1 - P_i^1) = R_{r,s} + P_i R_{r,f}$), M_n , p_n , M_h y p_h pueden expresarse en función de las probabilidades de estado. El valor de las citadas tasas para el modelo en estudio se encuentra en el Apéndice B.2.2. Siguiendo el proceso definido en el Apéndice B.2.3, se obtiene:

$$p_h = \frac{\sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h)}{\sum_{m=0}^{Q_n} [\pi(C, m, Q_h) + \pi(C, m, Q_h - 1)]}, \quad (3.3)$$

Tabla 3.3: Tasas de transición del modelo aproximado para el sistema de dos órbitas de reintentos.

Transición	Condición	Tasa
$(k, m, s) \rightarrow (k + 1, m, s)$	$0 \leq k \leq L - 1$	$m < Q_n \ \& \ s < Q_h$ λ
		$m < Q_n \ \& \ s = Q_h$ $\lambda + \beta_h$
		$m = Q_n \ \& \ s < Q_h$ $\lambda + \beta_n$
		$m = Q_n \ \& \ s = Q_h$ $\lambda + \beta_n + \beta_h$
$k = L$	$m < Q_n \ \& \ s < Q_h$	$\lambda_h + f\lambda_n$
		$\lambda_h + \beta_h + f\lambda_n$
		$\lambda_h + f(\beta_n + \lambda_n)$
		$\lambda_h + \beta_h + f(\beta_n + \lambda_n)$
$L < k \leq C$	$m < Q_n \ \& \ s < Q_h$	λ_h
		$\lambda_h + \beta_h$
		λ_h
		$\lambda_h + \beta_h$
$(k, m, s) \rightarrow (k + 1, m, s - 1)$	$0 \leq k \leq C - 1$	$1 \leq s \leq Q_h - 1$ $s\mu_{ret}$
		$s = Q_h$ α_h
$(k, m, s) \rightarrow (k, m, s - 1)$	$k = C$	$1 \leq s \leq Q_h - 1$ $s\mu_{ret}P_{ih}$
		$s = Q_h$ $\alpha_h P_{ih}$
$(k, m, s) \rightarrow (k + 1, m - 1, s)$	$0 \leq k \leq L - 1$	$1 \leq m \leq Q_n - 1$ $m\mu_{red}$
		$m = Q_n$ α_n
		$k = L$ $1 \leq m \leq Q_n - 1$ $m\mu_{red}f$
$(k, m, s) \rightarrow (k, m - 1, s)$	$k = L$	$m = Q_n$ $\alpha_n f$
		$1 \leq m \leq Q_n - 1$ $m\mu_{red}(1 - f)P_{in}$
		$m = Q_n$ $\alpha_n(1 - f)P_{in}$
$L < k \leq C$	$1 \leq m \leq Q_n - 1$	$m\mu_{red}P_{in}$
		$m = Q_n$ $\alpha_n P_{in}$
$(k, m, s) \rightarrow (k - 1, m, s)$	$1 \leq k \leq C$	$k\mu$
$(k, m, s) \rightarrow (k, m, s + 1)$	$k = C$	$\lambda_h(1 - P_{ih}^1)$
$(k, m, s) \rightarrow (k, m + 1, s)$	$k = L$	$\lambda_n(1 - P_{in}^1)(1 - f)$
	$L < k \leq C$	$\lambda_n(1 - P_{in}^1)$
Nota: $\alpha_n = M_n\mu_{red}(1 - p_n)$, $\beta_n = M_n\mu_{red}p_n$		
$\alpha_h = M_h\mu_{ret}(1 - p_h)$, $\beta_h = M_h\mu_{ret}p_h$.		

$$M_h = \frac{\lambda_n(1 - P_{ih}^1) \left(\sum_{m=0}^{Q_h} [(\pi(C, m, Q_h) + \pi(C, m, Q_h - 1))] \right)}{\mu_{ret} \left(\sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_h} \pi(k, m, Q_h) + P_{ih} \sum_{m=0}^{Q_h} \pi(C, m, Q_h) \right)}, \quad (3.4)$$

$$p_n = \frac{\zeta_1}{\zeta_2}, \quad M_n = \frac{\lambda_n(1 - P_{in}^1)\zeta_2}{\mu_{red}\zeta_3}, \quad (3.5)$$

donde

$$\zeta_1 = \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) + (1-f) \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s),$$

$$\zeta_2 = \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} [\pi(k, Q_n - 1, s) + \pi(k, Q_n, s)] + (1-f) \sum_{s=0}^{Q_h} [\pi(L, Q_n - 1, s) + \pi(L, Q_n, s)],$$

$$\begin{aligned} \zeta_3 = & \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) + f \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) + (1-f) P_{in} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) + \\ & + P_{in} \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s). \end{aligned}$$

Las ecuaciones de balance globales, la condición de normalización y las ecuaciones (3.3)–(3.5) forman un sistema de ecuaciones que puede ser resuelto, por ejemplo, empleando el siguiente proceso iterativo: hacer $p_n = p_h = 0$, $M_n = Q_n$ y $M_h = Q_h$ y calcular las probabilidades de estado usando el algoritmo 0 definido en [Ser02], calcular el nuevo valor de M_n , p_n , M_h y p_h usando las ecuaciones (3.3)–(3.5) y empezar de nuevo. En todos los experimentos numéricos realizados se ha repetido este proceso iterativo hasta que

la diferencia relativa entre dos iteraciones consecutivas es inferior a 10^{-4} para los cuatro parámetros.

Para el sistema definido se tendrán los siguientes parámetros de prestaciones para las sesiones nuevas:

$$\begin{aligned}
 P_{si}^n &= \frac{(R_{1,s})_n}{(R_o)_n} = \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, m, s) + f \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, m, s), \\
 P_{sr}^n &= \frac{(R_{r,s})_n}{(R_o)_n} = \lambda_n^{-1} \mu_{red} \left[\sum_{k=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{Q_n-1} \sum_{s=0}^{Q_h} m \pi(k, m, s) + M_n \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) + \right. \\
 &\quad \left. + f \sum_{m=0}^{Q_n-1} \sum_{s=0}^{Q_h} m \pi(L, m, s) + M_n f \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) \right], \\
 P_{ns}^n &= \frac{(R_{ab})_n}{(R_o)_n} = \lambda_n^{-1} \mu_{red} P_{in} \left[\sum_{k=L+1}^C \sum_{m=0}^{Q_n-1} \sum_{s=0}^{Q_h} m \pi(k, m, s) + M_n \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) + \right. \\
 &\quad \left. + (1-f) \sum_{m=0}^{Q_n-1} \sum_{s=0}^{Q_h} m \pi(L, m, s) + M_n (1-f) \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) \right] + \\
 &\quad + P_{in}^1 \left[(1-f) \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, m, s) + \sum_{k=L+1}^C \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, m, s) \right], \\
 P_b^n &= P_{sr}^n + P_{ns}^n = \sum_{k=L+1}^C \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, m, s) + (1-f) \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, m, s), \\
 u_n &= \frac{\mu_{red}}{\lambda_n} (1 - P_{in}) \left[\sum_{k=L+1}^C \sum_{m=0}^{Q_n-1} \sum_{s=0}^{Q_h} m \pi(k, m, s) + M_n \zeta_1 + (1-f) \sum_{m=0}^{Q_n-1} \sum_{s=0}^{Q_h} m \pi(L, m, s) \right] + \\
 &\quad + (1 - P_{in}^1) \left[(1-f) \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, m, s) + \sum_{k=L+1}^C \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, m, s) \right], \\
 N_{red} &= \sum_{k=0}^C \sum_{m=0}^{Q_n-1} \sum_{s=0}^{Q_h} m \pi(k, m, s) + M_n \sum_{k=0}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s).
 \end{aligned}$$

Y las expresiones para los *handovers* son:

$$P_{si}^h = \frac{(R_{1,s})_h}{(R_o)_h} = \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, m, s),$$

$$P_{ds}^h = \frac{(R_{r,s})_h}{(R_o)_h} = \lambda_h^{-1} \mu_{ret} \left[\sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h-1} s \pi(k, m, s) + M_h \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(k, m, Q_h) \right],$$

$$P_{ns}^h = \frac{\mu_{ret}}{\lambda_h} P_{ih} \left[\sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h-1} s \pi(C, m, s) + M_h \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h) \right] + P_{ih}^1 \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(C, m, s),$$

$$P_b^h = \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(C, m, s),$$

$$P_{tf} = \frac{N_H P_{ns}^h}{1 + N_H P_{ns}^h},$$

$$u_h = \frac{\mu_{ret}}{\lambda_h} (1 - P_{ih}) \left[\sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h-1} s \pi(C, m, s) + M_h \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h) \right] + (1 - P_{ih}^1) \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(C, m, s),$$

$$N_{ret} = \sum_{k=0}^C \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h-1} s \pi(k, m, s) + M_h \sum_{k=0}^C \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(k, m, Q_h).$$

Siendo u_n y u_h el número medio de remarcados y reintentos automáticos para cada sesión, respectivamente.

Resultados numéricos

En esta sección se ofrecen algunos experimentos numéricos con un doble propósito. Por una parte, ilustrar la capacidad y versatilidad del modelo de resolución propuesto para obtener soluciones precisas. Por otra parte, la mayor parte de la sección está dedicada a analizar el impacto de diferentes aspectos en el tipo de redes celulares considerado. Para todos los experimentos

llevados a cabo, y a menos que se indique lo contrario, se han empleado los siguientes parámetros: $C = 32$, $N_H = \mu_r / \mu_s = 2$, $\mu = \mu_r + \mu_s = 1 \text{ s}^{-1}$, $t = 31$, $P_{ih} = P_{in} = 0.2$, $\mu_{red} = 20 \text{ s}^{-1}$, $P_{ih}^1 = P_{in}^1 = 0$, $\mu'_r = 10\mu_r$ y $\mu_{ret} = 100/3 \text{ s}^{-1}$.

Precisión de la técnica de resolución propuesta:

Se va a evaluar la precisión del análisis aproximado propuesto como función de los parámetros Q_n y Q_h . Para una función indicadora I y dados dos valores para Q_n y Q_h , el error relativo introducido por el modelo aproximado viene dado por

$$\epsilon_I(Q_n, Q_h) = \left| \frac{I(Q_n+1, Q_h+1)}{I(Q_n, Q_h)} - 1 \right|.$$

En la Fig. 3.15 se muestra el error relativo estimado como función de $Q = Q_n = Q_h$ empleando como indicadores N_{red} y N_{ret} . Se ha probado el comportamiento del modelo propuesto usando la configuración básica empleada para dos tasas de llegada diferentes, $\lambda_n = 8$ y $\lambda_n = 12$, con el objetivo de estudiar el sistema con baja carga y altamente cargado. Como cabría esperar, excepto para una pequeña fase transitoria, se observa que el valor de $\epsilon_I(Q_n, Q_h)$ disminuye conforme aumentan Q_n y Q_h , y también que una carga superior resulta en una precisión peor. Las curvas también muestran que se pueden conseguir unas buenas prestaciones con un valor relativamente bajo de Q , habiéndose observado este hecho en todos los ejemplos numéricos llevados a cabo. Finalmente, hay que especificar que en todos los ejemplos numéricos que se van a mostrar y que emplean el procedimiento especificado, los valores de Q_n y Q_h han sido escogidos de modo que $\epsilon_{N_{red}}(Q_n, Q_h) < 10^{-4}$ y $\epsilon_{N_{ret}}(Q_n, Q_h) < 10^{-4}$.

Redimensionado con remarcados:

Debido al comportamiento humano, los usuarios normalmente remarcan cuando un intento previo de acceso al sistema ha sido bloqueado. Sin embargo, los operadores de redes celulares no consideran los remarcados como tal porque no son fáciles de distinguir de las peticiones de establecimiento nuevas. Sin esa distinción, puede tener lugar un sobredimensionado debido

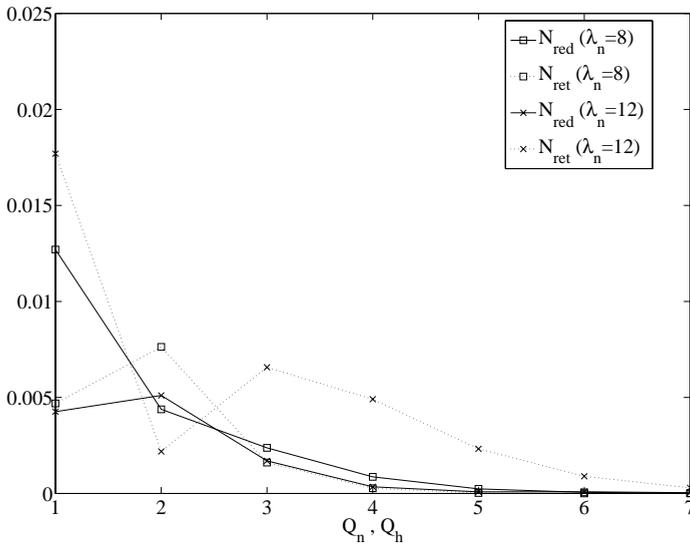
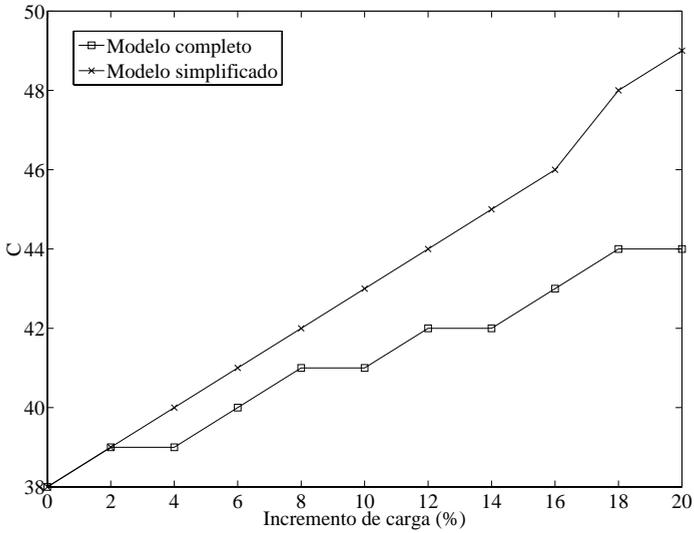
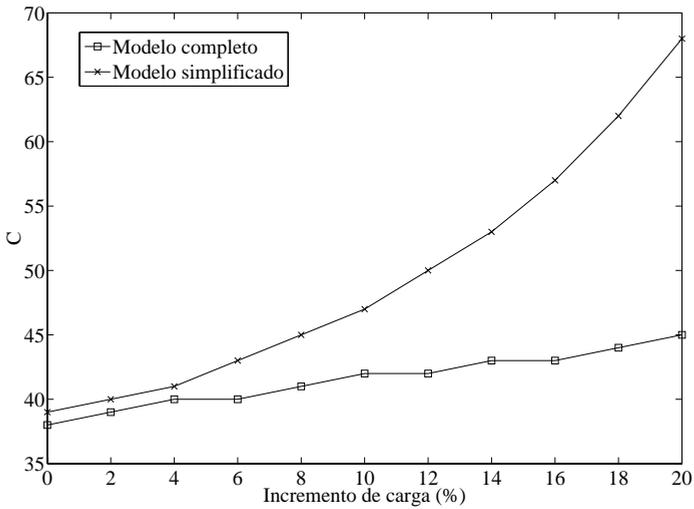


Figura 3.15: Precisión de la metodología aproximada para el modelo con dos órbitas.

a que para cada usuario pidiendo servicio cuyo primer intento se bloquea, se consideran varios intentos de acceso al sistema, cuando en realidad sólo se demanda un único servicio. Así, intuitivamente, la carga que introducen los remarcados debe ser tomada en cuenta, pero no debe considerarse como nuevas sesiones. Para evaluar la magnitud de ese sobredimensionado, se emplea el siguiente experimento. Se comienza con una situación básica en la que los objetivos de QoS ($P_b^n \leq 0.05$ y $P_{tf} \leq 0.005$) se satisfacen y se consideran varios valores de incremento de la carga. Para cada valor de incremento de la carga, la cantidad de recursos (C) se redimensiona con el objetivo de satisfacer los objetivos de QoS. Así, el proceso de redimensionado se efectúa usando tanto el modelo completo como un modelo simplificado donde los remarcados se consideran como una tasa añadida a la de nuevas sesiones, es decir, $\lambda'_n = \lambda_n + \lambda_{red}$, donde $\lambda_{red} = \mu_{red}N_{red}$. Este modelo simplificado se



(a) $P_{in} = 0.1$.



(b) $P_{in} = 0$.

Figura 3.17: Redimensionado de recursos para el modelo de dos órbitas considerando y no haciéndolo los remarcados.

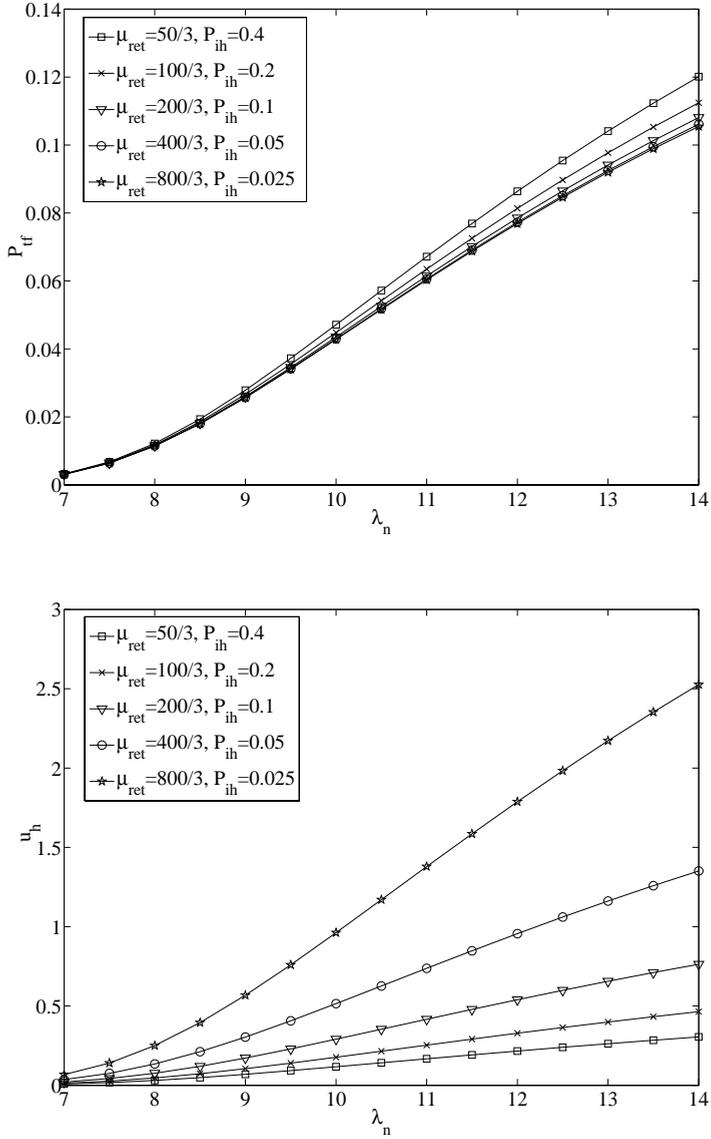


Figura 3.18: Parámetros de prestaciones para diferentes configuraciones de los reintentos automáticos para el modelo con dos órbitas de reintentos.

La elección del valor de β depende de muchos factores y el valor adecuado puede oscilar ampliamente de una situación a otra, por lo que se ha empleado un amplio rango para este parámetro. La forma de las curvas de coste de la Fig. 3.19(a) muestran la existencia de un punto de configuración óptimo. Tanto la importancia del punto de configuración óptimo como el valor de μ_{ret} en el cual se consigue se incrementan cuando aumenta el factor de peso β .

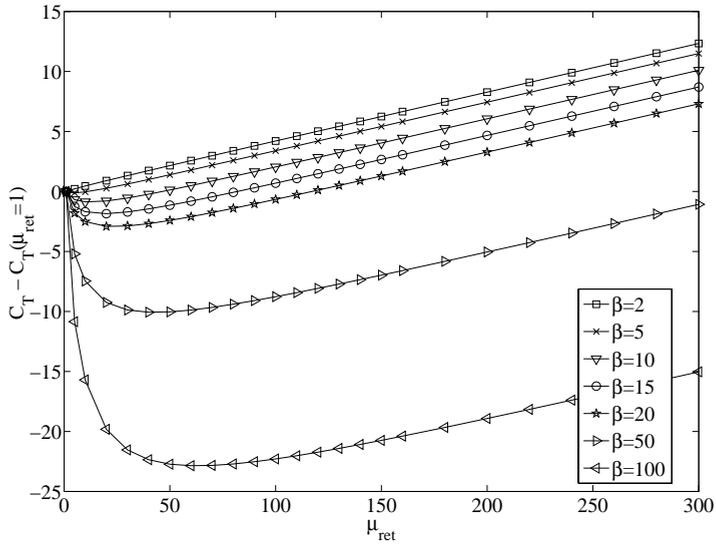
También se explora el efecto de variar el tiempo medio de residencia en el área de solape $1/\mu'_r$ (realmente un parámetro normalizado respecto a $1/(C\mu)$, ya que se ha usado $\Gamma = C\mu/\mu'_r$). La Fig. 3.19(b) muestra que el valor óptimo de μ_{ret} es prácticamente insensible al tiempo medio de permanencia en el área de solape.

Distribución del número máximo y del tiempo entre reintentos:

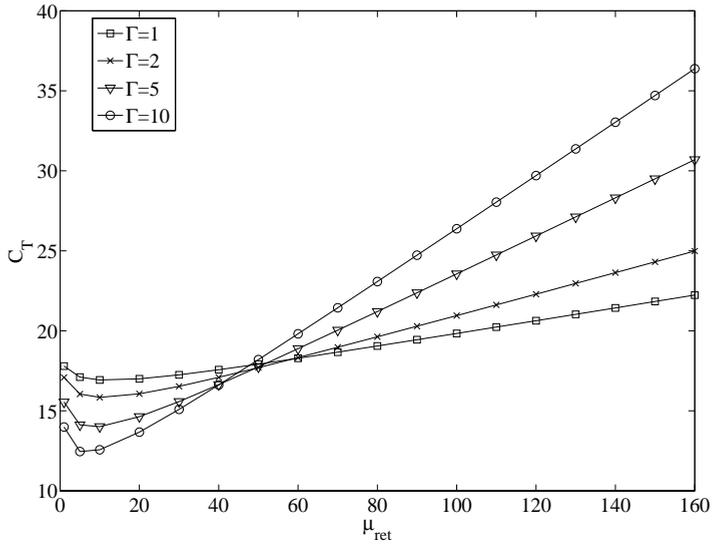
En las redes celulares actuales, como por ejemplo las redes GSM, el tiempo entre reintentos automáticos, así como el número máximo de estos, toma un valor determinista más que uno estocástico [ODEa02]. Sin embargo, en el modelo presentado y con el fin de mantener el análisis matemático tratable, se ha usado una distribución exponencial entre reintentos y una distribución geométrica para su número máximo. Aquí se validan estas dos suposiciones con la ayuda de un simulador de eventos discretos. Por simplificar las simulaciones se ha tomado $\lambda_h = 2\lambda_n$ en vez de calcular el valor de equilibrio para λ_h .

- Distribución del tiempo entre remarcados/reintentos automáticos:

Se analizan los valores de P_b^n , P_b^h , u_n y u_h cuando las distribuciones del tiempo entre remarcados, reintentos automáticos o ambas se cambian de exponenciales a deterministas, manteniendo constante su valor medio. De los resultados mostrados en las Fig. 3.20 y Fig. 3.21 se determina que asumir una distribución exponencial para el tiempo medio entre remarcados y/o reintentos automáticos no tiene un impacto significativo. Además, aunque no se muestran, se obtienen conclusiones similares para el resto de parámetros de mérito considerados.



(a) Incremento ($C_T(\mu_{ret}) - C_T(1)$) cuando μ_{ret} varía, $\Gamma = 1$.



(b) Valor absoluto, $\beta = 10$.

Figura 3.19: Función de coste para el modelo con dos órbitas de reintentos, $\lambda_n = 12$.

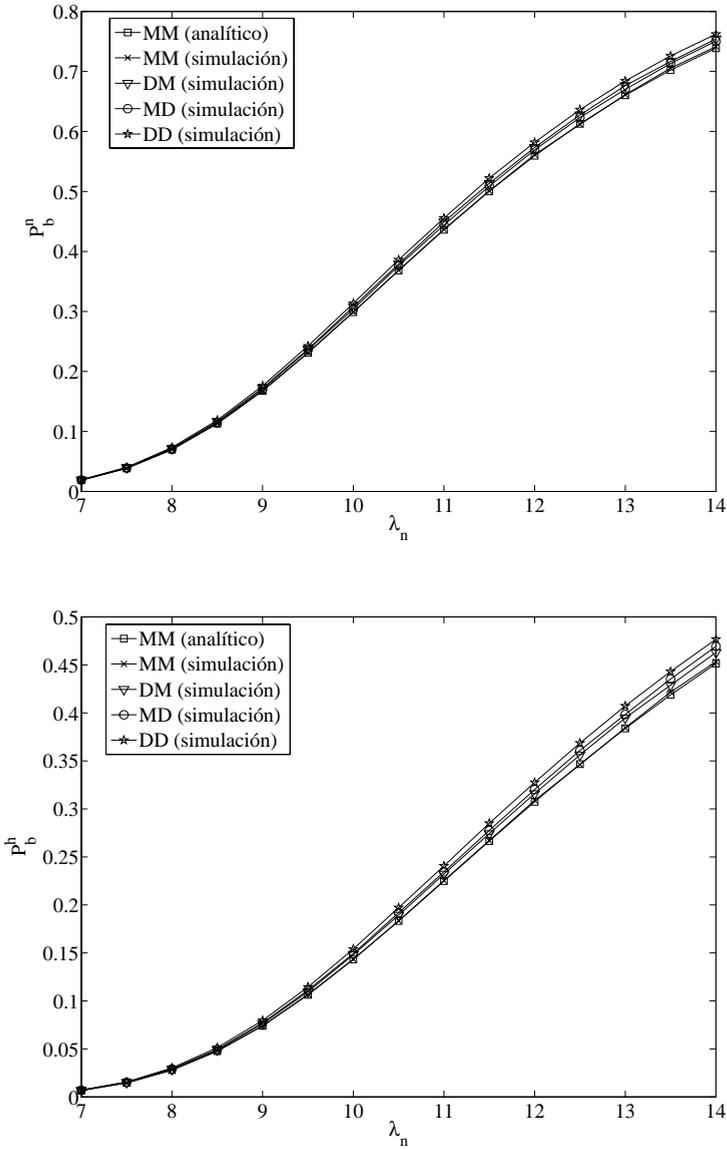


Figura 3.20: Distribución del tiempo entre reintentos: impacto en P_b^m y P_b^h .
 Leyenda: XY, X (Y) \equiv distribución para los remarcados (reintentos automáticos); M \equiv exponencial, D \equiv determinista.

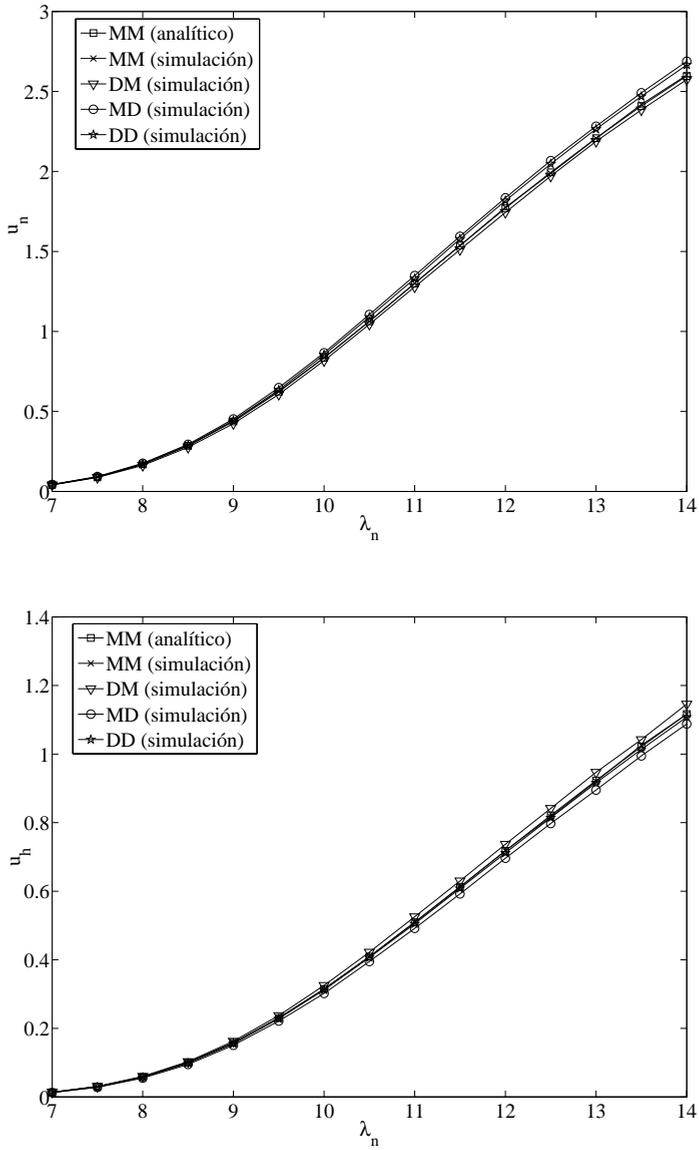


Figura 3.21: Distribución del tiempo entre reintentos: impacto en u_n y u_h .
 Leyenda: XY , X (Y) \equiv distribución para los remarcados (reintentos automáticos); M \equiv exponencial, D \equiv determinista.

Además de la distribución exponencial ($CV = 1$) y de la determinista ($CV = 0$) se han considerado también las distribuciones hiperexponencial y erlanguiana. La variabilidad o CV de la distribución erlanguiana está entre la determinista y la exponencial, es decir, $0 < CV < 1$. Más concretamente, la distribución erlanguiana empleada consta de dos fases exponenciales idénticas de tasa $2\mu_{red}$, por lo que $CV = 1/\sqrt{2}$. Por otra parte, la distribución hiperexponencial permite una mayor variabilidad, ya que $CV > 1$, habiéndose empleado una hiperexponencial de dos fases y $CV = 1.5$. Empleando las distribuciones mencionadas, se realiza un conjunto de simulaciones cubriendo un amplio rango de escenarios para evaluar el impacto que tiene la variabilidad del tiempo medio entre remarcados en las prestaciones del sistema. En todos los casos se ha mantenido el valor medio del tiempo medio entre remarcados, $1/\mu_{red}$. La Fig. 3.22 muestra un ejemplo típico de los resultados obtenidos. De forma general puede concluirse que en la práctica, y para todos los parámetros de mérito estudiados, la sensibilidad a la distribución del tiempo entre remarcados es despreciable. Obviamente, se pueden extraer conclusiones similares para los reintentos automáticos.

- Distribución del número máximo de reintentos:

Como ya se ha dicho, habitualmente el número máximo de reintentos viene determinado por una distribución determinista, mientras que el modelo propuesto considera una distribución geométrica para el número máximo de reintentos, ya que después de cada intento de acceso fallido el usuario abandona el sistema con cierta probabilidad. En el caso determinista que nos ocupa, se llama d al número máximo de reintentos permitidos cuando se emplea una distribución determinista. Para poder comparar la distribución determinista con la exponencial, el número medio de reintentos debe coincidir en ambos casos. Nótese que para la distribución determinista la media no es d , sino que d representa el número máximo de reintentos. Puesto que es más intuitivo pensar en la distribución determinista para el número de reintentos

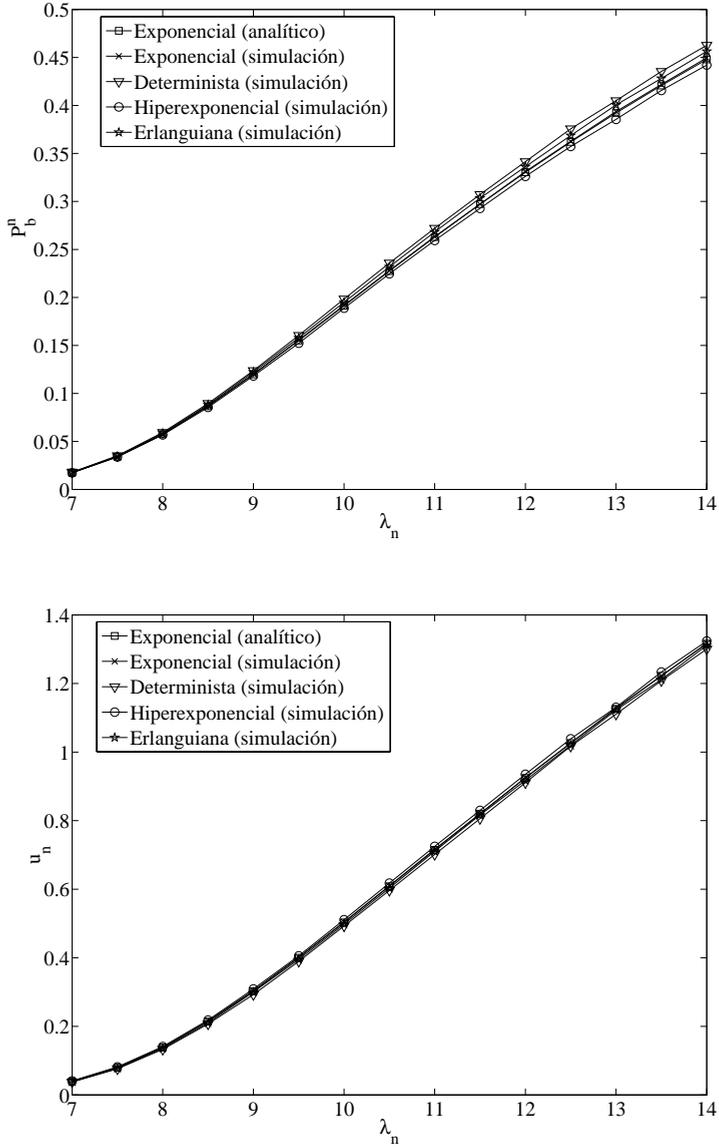


Figura 3.22: Otras distribuciones para el tiempo medio entre remarcados en el modelo con dos órbitas de reintentos.

automáticos que para el número de remarcados, se va a efectuar para el primero, si bien, el procedimiento es completamente aplicable a los remarcados.

Si q denota la probabilidad de bloqueo para los reintentos automáticos (nótese que en general $q \neq P_b^h$), el número medio de reintentos automáticos es, para el caso geométrico,

$$u_h^{Geo} = \sum_{n \geq 1} P_b^h (1 - P_{ih}^1) ((1 - P_{ih})q)^{n-1} (1 - (1 - P_{ih})q) = \frac{(1 - P_{ih}^1)P_b^h}{1 - (1 - P_{ih})q}. \quad (3.6)$$

Y en el caso determinista,

$$u_h^D = (1 - q)P_b^h [1 + 2q + 3q^2 + \dots + (d - 1)q^{d-2}] + dP_b^h q^{d-1} = P_b^h \frac{1 - q^d}{1 - q}. \quad (3.7)$$

Si se asume que q y P_b^h tienen aproximadamente el mismo valor en ambos casos, igualando las ecuaciones (3.6) y (3.7) obtenemos

$$P_{ih} = \frac{1 - q}{q(1 - q^d)} (q^d - P_{ih}^1). \quad (3.8)$$

Para un valor dado de d , usando las expresiones para P_b^h y u_h y las ecuaciones (3.6) y (3.8), el valor de P_{ih} que hace $u_h^{Geo} = u_h^D$ puede obtenerse de forma iterativa. Nótese que se ha empleado $P_{ih}^1 = 0$. Los resultados de la Fig. 3.23 muestran que usando el procedimiento de ajuste descrito el modelo propuesto puede suponer una excelente aproximación para el análisis de prestaciones de un sistema en el que el número máximo de reintentos es un número determinista.

3.4 Otros mecanismos de resolución

A diferencia de la sección anterior, la presente sección aborda el tema del desarrollo de técnicas de resolución de sistemas con reintentos genéricos sin las peculiaridades de las redes celulares. En este sentido, se desarrolla

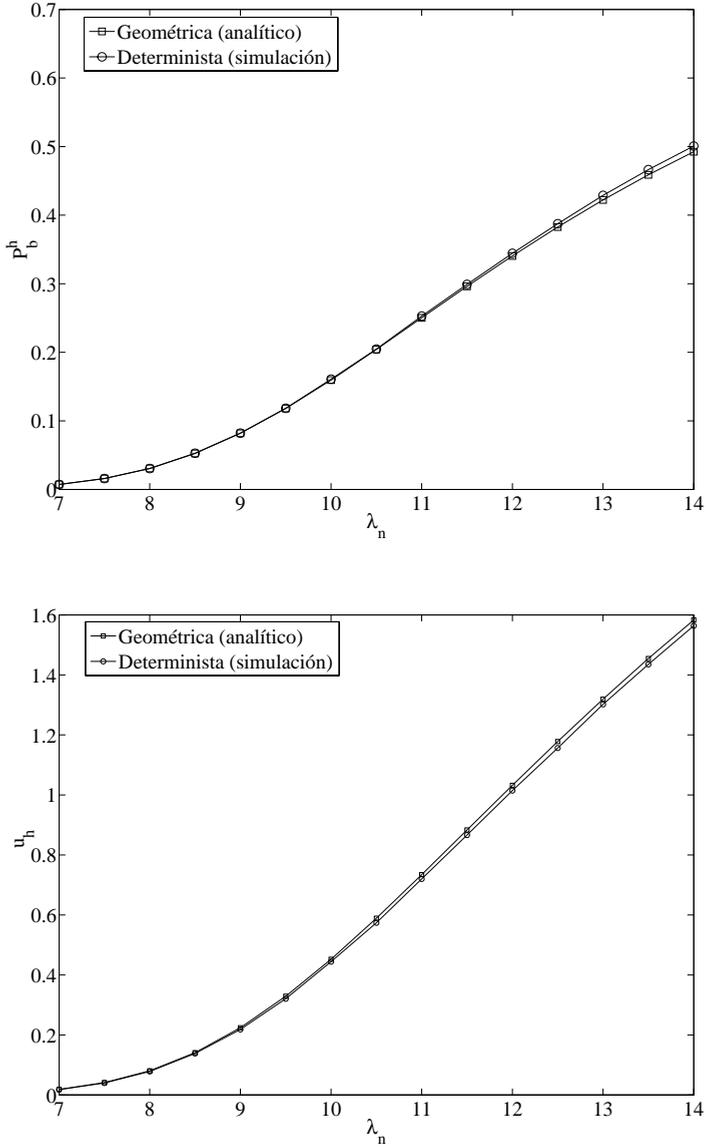


Figura 3.23: Aproximación analítica de un número máximo de reintentos automáticos determinista; $d = 5$, $P_{ih}^1 = 0$.

una técnica de resolución, denominada *value extrapolation* y se compara con propuestas previas. Aunque la técnica desarrollada es aplicable a escenarios celulares, se va a aplicar a un sistema $M/M/C$ con un tiempo entre reintentos distribuido exponencialmente. El motivo de usar este escenario es por la posibilidad que nos ofrece de comparar los resultados con otras técnicas y modelos aparecidos en la literatura relacionada con la investigación operativa, como son los propuestos por Falin [Fal83], Neuts y Rao [NR90] y Artalejo y Pozo [AP02]. Además, también se va a emplear el método descrito en las secciones anteriores (llamado FM) para el escenario en estudio.

3.4.1 *Value extrapolation* en sistemas con reintentos

Como ya se ha visto en secciones anteriores, al analizar sistemas con reintentos aparecen espacios de estados infinitos no homogéneos, por lo que, de modo general, hay que desarrollar modelos y técnicas de resolución aproximadas que permitan conocer los principales parámetros de prestaciones con bastante precisión. Hasta donde llega el conocimiento del autor, todas las técnicas desarrolladas hasta el momento que tratan de resolver estos sistemas se basan en la solución numérica de las ecuaciones de Kolmogorov en régimen permanente del CTMC que describe el modelo estudiado. Sin embargo, muy recientemente, Leino et al. [LPV06, LV06, LV07] han introducido una aproximación alternativa para el cálculo de parámetros de mérito de procesos de Markov de cardinalidad infinita. El nuevo método, denominado *value extrapolation* (en adelante VE), no se basa en la resolución de las ecuaciones de balance globales, sino que considera el sistema como un proceso de decisión de Markov (*Markov Decision Process*, MDP) y resuelve las ecuaciones de Howard para un espacio de estados truncado finito. No obstante, en lugar de emplear una truncación simple, los *relative state values*⁴ de los estados

⁴Se ha preferido emplear la terminología anglosajona por estar generalizada y evitar la confusión de su traducción al castellano, en la que no existe unanimidad. Otro motivo añadido es por su similar significado a los *state-action values* que aparecerán en el siguiente capítulo. Asimismo, se empleará la terminología *state values* o *relative state values* indistintamente.

ignorados se extrapolan como función del valor de algunos o de todos los estados considerados. Así, se podrá calcular cualquier parámetro de prestaciones mientras se pueda expresar como el valor esperado de una variable aleatoria que sea función del estado del sistema.

Hasta la fecha, VE se ha aplicado en colas con un único servidor y múltiples clases, con unos resultados prometedores [LPV06, LV06, LV07]. Nótese que un aspecto clave en la aplicación de VE es la elección de la función de extrapolación, por lo que si no se realiza una buena elección, los resultados pueden distar de los exactos. De hecho, en [LV07] los autores muestran que seleccionando una función polinómica adecuada, el método arroja resultados exactos para diferentes momentos de la longitud de la cola en un sistema DPS (*Discriminatory Processor-Sharing*) con múltiples clases. Desafortunadamente, la idoneidad de la función de extrapolación depende tanto del sistema como del parámetro que se quiera calcular, por lo que no existe una elección universal para esta función.

El uso que se realiza de la técnica VE es completamente diferente al realizado hasta el momento, en parte debido a que hasta ahora sólo se ha aplicado en problemas en los que los *relative state values* de los estados se estima que siguen una tendencia polinómica. Ahora, se va aplicar VE a sistemas multiservidor con reintentos. Una de las principales limitaciones de VE es que únicamente se puede calcular un parámetro de mérito cada vez que se resuelve el sistema, aunque se han aplicado técnicas clásicas del álgebra lineal que nos permiten calcular varios parámetros simultáneamente, incrementando el coste computacional de forma marginal.

Se va a desarrollar la metodología VE en dos sistemas con reintentos diferentes. En el primero de ellos, se tiene en cuenta el fenómeno de la impaciencia, mientras que el segundo es un caso particular de este donde no se contempla tal fenómeno. La motivación de desarrollar el segundo modelo es para poder realizar un análisis comparativo con algunos algoritmos aparecidos en la literatura que no contemplan la impaciencia.

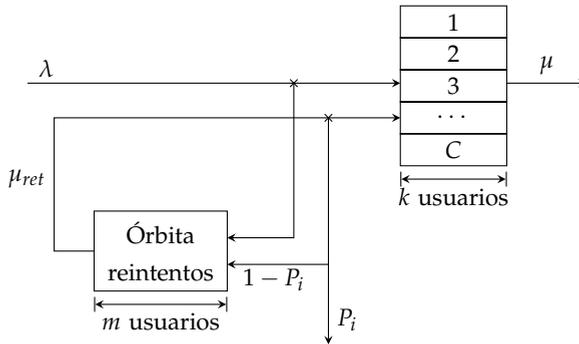


Figura 3.24: Sistema con reintentos con impaciencia considerado por VE.

3.4.2 Aplicación a un escenario con impaciencia

El modelo estudiado es un sistema multiservidor que considera reintentos por parte de los usuarios bloqueados e impaciencia de estos, como se observa en la Fig. 3.24. Así, los usuarios que llegan al sistema siguiendo un proceso de Poisson con tasa λ compiten por acceder a un sistema que dispone de C servidores, demandando un tiempo de servicio distribuido exponencialmente con tasa μ . Cuando un usuario encuentra todos los servidores ocupados, pasa a formar parte de la órbita de reintentos, de capacidad infinita. Después de un tiempo distribuido exponencialmente con tasa μ_{ret} el usuario reintenta su acceso, teniendo éxito si encuentra algún servidor disponible. De otro modo, el usuario abandona el sistema con probabilidad P_i o vuelve a la órbita de reintentos con la probabilidad complementaria, comenzando el proceso del reintento de nuevo.

El modelo considerado puede representarse mediante una CTMC bidimensional, $S(t)$. Si k es el número de usuarios en servicio y m el número de usuarios en la órbita de reintentos el espacio de estados se define mediante

$$S := \{s = (k, m) : k \leq C; \quad m \in \mathbb{Z}_+\}.$$

La Fig. 3.25 muestra el diagrama de transiciones del sistema, mostrando dos importantes propiedades en la dimensión correspondiente al número de

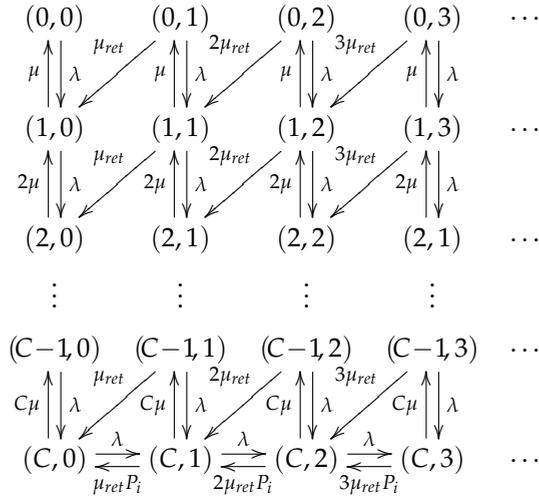


Figura 3.25: Diagrama de transiciones del sistema con reintentos con impaciencia considerado por VE.

usuarios en la órbita de reintentos. Por una parte, su cardinalidad infinita y, por otra, su no homogeneidad producida por el hecho de que la tasa de reintentos depende del número de usuarios en la órbita.

Marco teórico

Como ya se ha dicho, el problema considerado no tiene solución cerrada cuando $C > 2$ [AP02], así que es necesario recurrir a técnicas aproximadas. Los métodos aparecidos en la literatura calculan las probabilidades de estado en régimen permanente a partir de las ecuaciones de balance globales para calcular posteriormente los parámetros de mérito deseados.

El método VE no se basa en las probabilidades de estado, sino que se basa en los *relative state values* que aparecen cuando se considera el sistema en su forma de MDP. Formalmente, un MDP puede definirse como la tupla $\{S, \mathcal{A}, \mathcal{P}, \mathcal{R}\}$, donde S es un conjunto de estados, \mathcal{A} es un conjunto de ac-

ciones, \mathcal{P} es una función de transición entre estados y \mathcal{R} es una función de recompensa (*revenue function*). El estado del sistema puede controlarse eligiendo acciones a de \mathcal{A} , lo cual tiene influencia en las transiciones de estado. La función de transición $\mathcal{P} : \mathcal{S} \times \mathcal{S} \times \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}_+$ especifica la tasa de transición a otros estados cuando se toma una determinada acción en un estado dado. La primera característica de la técnica VE es la definición de una función de recompensa como función del estado del sistema, es decir, $r(s)$. A partir de la definición de la función de recompensa para cada estado, también se tiene una recompensa del proceso entero, r , que será el parámetro de mérito que se desea calcular.

Una vez definido un MDP y las funciones de recompensa, se pueden definir los *relative state values* ($v(s)$). Es obvio que después de ejecutar una acción en el estado s el sistema obtendrá una recompensa por haber realizado esa acción ($r(s)$), pero, conforme el número de transiciones aumenta, la recompensa media converge a r . Los *relative state values* expresan cuál es la recompensa esperada acumulada sobre un horizonte temporal infinito cuando el sistema empieza en el estado s en comparación con la obtenida cuando la recompensa en todos los estados es r . Si denotamos mediante t_n los instantes de tiempo en los cuales hay un cambio de estado en el sistema, entonces

$$v(s) = E \left[\sum_{n=0}^{\infty} (r(S(t_n)) - r) \middle| S(t_0) = s \right]. \quad (3.9)$$

Las ecuaciones que relacionan recompensas, *relative state values* y tasas de transición son las ecuaciones de Howard, definidas por:

$$r(s) - r + \sum_{s'} q_{ss'} (v(s') - v(s)) = 0 \quad \forall s. \quad (3.10)$$

Para el sistema estudiado, las ecuaciones de Howard son:

Para $k < C$ y $m \in \mathbb{Z}_+$:

$$r(k, m) - r + \lambda[v(k+1, m) - v(k, m)] + k\mu[v(k-1, m) - v(k, m)] + m\mu_{ret}[v(k+1, m-1) - v(k, m)] = 0.$$

Para $k = C$ y $m \in \mathbb{Z}_+$:

$$r(C, m) - r + \lambda[v(C, m + 1) - v(C, m)] + C\mu[v(C - 1, m) - v(C, m)] + m\mu_{ret}P_i[v(C, m - 1) - v(C, m)] = 0.$$

Se puede observar que el número de estados es infinito porque m puede tomar cualquier valor en \mathbb{Z}_+ , por lo que se ha truncado el espacio de estados al subconjunto $\hat{\mathcal{S}}$, del siguiente modo:

$$\hat{\mathcal{S}} := \{s = (k, m) : k \leq C; \quad m \leq Q\}.$$

Con esta truncación ya se tiene un número finito de ecuaciones de Howard, es decir, se tienen tantas ecuaciones como estados tiene el sistema truncado, $|\hat{\mathcal{S}}|$. Por otra parte, el número de incógnitas son los $|\hat{\mathcal{S}}|$ *relative state values* más la recompensa media r , es decir, $|\hat{\mathcal{S}}| + 1$ incógnitas. Sin embargo, como únicamente aparecen en las ecuaciones de Howard diferencias en los *relative state values*, se puede hacer $v(0) = 0$, por lo que, para el espacio truncado, se tendrá un sistema de ecuaciones con tantas ecuaciones como incógnitas.

Ajuste polinómico

Si llamamos $q_{ss'}$ a la tasa de transición del estado s al s' , la truncación tradicional consiste en hacer $q_{ss'} = 0 \quad \forall s' \notin \hat{\mathcal{S}}$. Sin embargo, VE considera una truncación más eficiente ya que tiene en cuenta, de algún modo, la contribución de los estados que no pertenecen a $\hat{\mathcal{S}}$. Básicamente, VE considera los *relative state values* fuera de $\hat{\mathcal{S}}$ que aparecen en las ecuaciones de Howard para los estados de $\hat{\mathcal{S}}$ como una extrapolación de algunos *relative state values* dentro de $\hat{\mathcal{S}}$. El hecho de no ignorarlos como hace la truncación tradicional es por lo que se espera que se mejore la precisión significativamente. De forma general, el objetivo de VE es encontrar una función $f(s)$ que interpole algunos puntos $(s, v(s))$ en $s \in \hat{\mathcal{S}}$ de modo que aproxime $(s, v(s))$ en $s \notin \hat{\mathcal{S}}$. Se pueden usar todos los pares $(s, v(s))$ del espacio de estados en el proceso de

ajuste (ajuste global) o únicamente un subconjunto de ellos (\mathcal{S}_f), denominándose entonces ajuste local. La elección de \mathcal{S}_f dependerá en gran medida del estado del cual se quiera extrapolar su *relative state value*. Así, es importante escoger una función de ajuste que haga que las ecuaciones de Howard se mantengan como un sistema de ecuaciones lineales. Las funciones más comunes que cumplen ese requisito son los polinomios, por lo que han sido los empleados en la presente tesis. Además, la función $f(s)$ y el conjunto \mathcal{S}_f debe escogerse de modo no ambiguo, es decir, el número de puntos diferentes en \mathcal{S}_f debe ser suficiente para obtener los parámetros del ajuste.

De forma general, para calcular los coeficientes del polinomio de ajuste a_i el proceso de ajuste tratará de minimizar el error cuadrático

$$E = \sum_{s \in \mathcal{S}_f} (f(s) - v(s))^2.$$

Los parámetros óptimos se pueden calcular resolviendo las ecuaciones

$$\frac{\partial E}{\partial a_i} = 0 \quad \forall i.$$

En el caso que nos ocupa, se van a emplear tantos puntos como número de parámetros tenga el polinomio de ajuste, por lo que el proceso de ajuste se reduce a una interpolación polinómica ordinaria y $E = 0$, es decir, el polinomio pasará por todos los puntos considerados. En este caso, el problema se puede formular del siguiente modo. Dado un conjunto de $n = |\mathcal{S}_f|$ puntos $(s_0, v(s_0)), \dots, (s_{n-1}, v(s_{n-1}))$, donde no hay dos s_i idénticos, podemos determinar un polinomio de grado $n - 1$ tal que $f(s_i) = v(s_i)$, siendo

$$f(s) = a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_{n-1}s^{n-1}.$$

El polinomio de ajuste satisface las siguientes n ecuaciones lineales

$$a_0 + a_1s_i + a_2s_i^2 + \dots + a_{n-1}s_i^{n-1} = v(s_i) \quad \forall i,$$

que de forma matricial es

$$Aa = \begin{bmatrix} 1 & s_0 & \dots & s_0^{n-1} \\ 1 & s_1 & \dots & s_1^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & s_{n-1} & \dots & s_{n-1}^{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v(s_0) \\ v(s_1) \\ \vdots \\ v(s_{n-1}) \end{bmatrix} = b.$$

La matriz de coeficientes de este sistema (A) es una matriz de Vandermonde, cuyo determinante es no nulo, por lo que siempre tiene inversa. Así, existe una solución única del sistema lineal considerado o, lo que es lo mismo, existe un único polinomio que pasa por los n puntos. Sin embargo, la matriz de Vandermonde es una matriz mal condicionada, especialmente si existen dos valores s_i muy próximos, por lo que el procedimiento para calcular el polinomio de ajuste mediante la solución de este sistema lineal también está mal condicionado. Es importante señalar que la unicidad del polinomio de interpolación no implica que no se pueda escribir de diferentes modos o que se pueda obtener mediante otras bases diferentes a la base monómica estándar. Ejemplos de bases polinómicas que reducen la dificultad de este proceso son las bases de Newton o las que se han empleado en este trabajo, las bases de Lagrange.

Para el problema de interpolación considerado, el polinomio en la forma de Lagrange es una combinación lineal

$$L(s) = \sum_{j=0}^{n-1} v(s_j) \ell_j(s),$$

de polinomios base de Lagrange

$$\ell_j(s) = \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{n-1} \frac{s - s_i}{s_j - s_i} = \frac{s - s_0}{s_j - s_0} \dots \frac{s - s_{j-1}}{s_j - s_{j-1}} \frac{s - s_{j+1}}{s_j - s_{j+1}} \dots \frac{s - s_{n-1}}{s_j - s_{n-1}}. \quad (3.11)$$

Como se puede observar, el método de obtención del polinomio interpolador de los puntos $(s_i, v(s_i))$ mediante las bases de Lagrange es inmediato a partir de su definición.

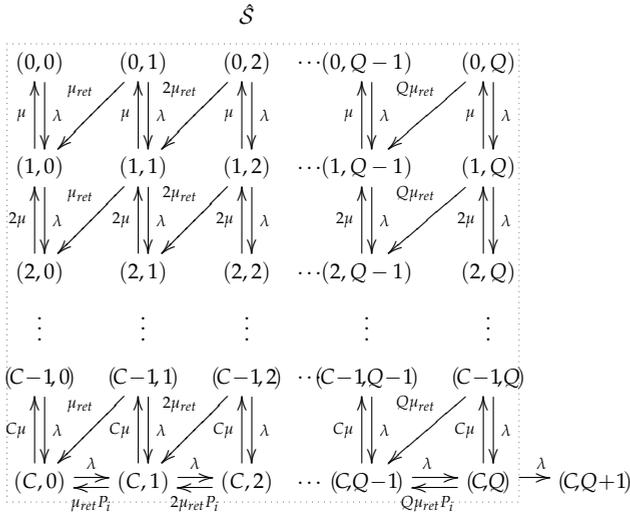


Figura 3.26: Modelo truncado y estados que aparecen en las ecuaciones de Howard fuera del modelo truncado.

En el caso concreto que nos ocupa, y como se muestra en la Fig. 3.26, se tendrá una ecuación de Howard en la que aparece $v(C, Q + 1)$, que es un estado que no pertenece a \hat{S} . Así, para extrapolar el valor de $v(C, Q + 1)$ se ha usado un ajuste local que emplea un polinomio de orden $(n - 1)$ que interpola los n puntos $(m, v(C, m))$, siendo $(Q - n) < m \leq Q$. Nótese que si $v(C, Q + 1)$ se conociera con exactitud, los resultados obtenidos de resolver el modelo truncado serían exactos. También debe apreciarse que incluir la extrapolación ni incrementa el coste computacional ni incrementa el número de ecuaciones de Howard, permaneciendo en $|\hat{S}| = (C + 1) \times (Q + 1)$. Por ejemplo, en el caso de extrapolación lineal, es decir, usando los puntos $(Q, v(C, Q))$ y $(Q - 1, v(C, Q - 1))$, se tiene el siguiente polinomio de interpolación:

$$\begin{aligned}
 v^{(2)}(C, s) &= v(C, Q) \frac{(s - Q + 1)}{1} + v(C, Q - 1) \frac{s - Q}{-1} = \\
 &= (v(C, Q) - v(C, Q - 1))s + v(C, Q)(1 - Q) + Qv(C, Q - 1).
 \end{aligned}$$

Reemplazando $s = Q + 1$ para calcular $v(C, Q + 1)$, se tiene:

$$v^{(2)}(C, Q + 1) = 2v(C, Q) - v(C, Q - 1).$$

Siguiendo un procedimiento similar al seguido en la extrapolación lineal, para un polinomio cuadrático se obtiene la siguiente relación:

$$v^{(3)}(C, Q + 1) = 3v(C, Q) - 3v(C, Q - 1) + 2v(C, Q - 2).$$

Y para el ajuste a un polinomio cúbico:

$$v^{(4)}(C, Q + 1) = 4v(C, Q) - 6v(C, Q - 1) + 4v(C, Q - 2) - v(C, Q - 3).$$

Para emplear polinomios de extrapolación de orden superior, se usan las correspondientes bases de Lagrange como se muestra en la ecuación 3.11, obteniéndose, cuando se quieren emplear n puntos para el polinomio extrapolador (polinomio de grado $(n - 1)$), la siguiente expresión:

$$v^{(n)}(C, Q + 1) = \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k \binom{t}{k+1} v(C, Q - k).$$

Como ejemplo y puesto que ha sido uno de los polinomios más profusamente empleado en este trabajo, el polinomio que emplea 9 puntos y por tanto es de grado 8 es:

$$\begin{aligned} v_{Q+1}^{(9)} = & 9v_Q - 36v_{Q-1} + 84v_{Q-2} - 126v_{Q-3} + 126v_{Q-4} - 84v_{Q-5} + \\ & + 36v_{Q-6} - 9v_{Q-7} + v_{Q-8}, \end{aligned}$$

llamando $v_x = v(C, x)$.

Función de recompensa

Puesto que los parámetros de mérito no se calculan a partir de las probabilidades de estado como es habitual, es necesario explicar con un mayor detalle

Tabla 3.4: Definición de la función de recompensa usando VE.

Parámetro de prestaciones	Símbolo	Valor
Probabilidad de estado (K, M)	$\pi(K, M)$	$r(k, m) = 1$ para $k = K, m = M$ $r(k, m) = 0$ resto de casos
Probabilidad de bloqueo	P_b	$r(k, m) = 1$ para $k = C, \forall m$ $r(k, m) = 0$ resto de casos
Probabilidad de K servidores ocupados	$B(K)$	$r(k, m) = 1$ para $k = K, \forall m$ $r(k, m) = 0$ resto de casos
Probabilidad de no servicio	P_{ns}	$r(k, m) = \frac{m\mu_r P_i}{\lambda}$ para $k = C, \forall m$ $r(k, m) = 0$ resto de casos
Número medio de usuarios reintentando	N_{ret}	$r(k, m) = m \forall k, \forall m$

cómo se calculan. Como se ha dicho con anterioridad, el parámetro r de las ecuaciones de Howard es el estadístico que se desea calcular. Por lo tanto, $r(s)$ será la contribución del estado s a ese estadístico. Por ejemplo, para calcular la probabilidad de bloqueo ($r = P_b$) el valor de $r(s)$ deberá ser la unidad en todos los estados en los que exista bloqueo, es decir, $r(C, m)$ y cero en el resto. En la Tabla 3.4 se resume cómo se deben configurar los diferentes $r(s)$ para obtener varios parámetros de prestaciones típicos de los sistemas con reintentos.

Efecto de VE en las ecuaciones de Howard

En el problema que se está estudiando, únicamente hay que reemplazar $v(C, Q + 1)$ por su valor aproximado en la ecuación de Howard que corres-

ponde al estado $v(C, Q)$. Por ejemplo, si se emplea extrapolación lineal la ecuación cambiaría a:

$$\begin{aligned} & r(C, Q) - r + v(C, Q)[- \lambda - C\mu - QP_i\mu_{ret}] + \\ & + \lambda v(C, Q + 1) + C\mu v(C - 1, Q) + QP_i\mu_{ret}v(C, Q - 1) = \\ & = r(C, Q) - r + v(C, Q)[\lambda - C\mu - QP_i\mu_{ret}] + \\ & + C\mu v(C - 1, Q) + [QP_i\mu_{ret} - \lambda]v(C, Q - 1) = 0. \end{aligned}$$

Puesto que $v(C, Q + 1)$ ya no aparece en las ecuaciones de Howard, el sistema lineal de ecuaciones tiene $(C + 1) \times (Q + 1)$ ecuaciones con el mismo número de incógnitas, una vez se ha hecho $v(0) = 0$. Por simplicidad, este sistema puede expresarse en su forma matricial, siendo $\mathbf{xT} = \mathbf{b}$, donde \mathbf{x} es un vector con las $(C + 1) \times (Q + 1)$ incógnitas y \mathbf{b} es la función de recompensa para los diferentes estados con un factor de -1 :

$$\mathbf{x} = \left[r \quad v(0, 1) \quad \dots \quad v(0, Q) \quad v(1, 0) \quad \dots \quad v(C, Q) \right],$$

$$\mathbf{b} = \left[-r(0, 0) \quad -r(0, 1) \quad \dots \quad -r(C, Q) \right].$$

La matriz \mathbf{T} representa la matriz de coeficientes, que se puede construir en dos pasos. Primero, se construye la matriz tridiagonal a bloques \mathbf{T}'^5 y posteriormente se hace la primera fila de la matriz \mathbf{T}' igual a -1 para construir la matriz \mathbf{T} . La fila con los valores -1 proviene del sumando $-r$ en las

⁵Cuando se ignoran los estados $s \notin \hat{\mathcal{S}}$, la matriz \mathbf{T}' se corresponde con el generador infinitesimal traspuesto (\mathbf{Q}^t), aunque se ha preferido emplear la nomenclatura \mathbf{T}' por el efecto que incluye la extrapolación en algunos valores de la matriz.

ecuaciones de Howard. La estructura de la matriz \mathbf{T}' es

$$\mathbf{T}' = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^0 & \mathbf{A}_0^0 & \dots & 0 & 0 \\ \mathbf{A}_2^1 & \mathbf{A}_1^1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{A}_1^{C-1} & \mathbf{A}_0^{C-1} \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{A}_2^C & \mathbf{A}_1^C \end{bmatrix},$$

donde las matrices \mathbf{A}_1^k , \mathbf{A}_2^k y \mathbf{A}_0^k se muestran en el apéndice B.3. Nótese que únicamente la matriz \mathbf{A}_1^C depende del orden del polinomio de ajuste. Esta característica hace que el orden del polinomio no afecte al coste computacional. Desafortunadamente, para resolver el sistema $\mathbf{xT} = \mathbf{b}$, no se pueden emplear los métodos que aprovechan la estructura tridiagonal a bloques como los propuestos en [GJL84, Ser02]. La fila con valores iguales a -1 nos impide usar estas metodologías. Por ese motivo, se debe usar un procedimiento general para resolver el sistema lineal de ecuaciones, como Gauss-Seidel, Gauss-Jordan o la factorización LU, por citar algunos ejemplos. También es interesante resaltar que de las $(C + 1) \times (Q + 1)$ incógnitas únicamente se quiere conocer una de ellas, r , que representa el parámetro de mérito deseado. Los *relative state values* no son útiles para el propósito propuesto, por lo que no es necesario calcularlos.

El principal inconveniente de VE es que este método es capaz de calcular un único parámetro de mérito cada vez que se resuelve el sistema. No obstante, se puede superar este inconveniente del siguiente modo. De forma general, la solución del sistema $\mathbf{xT} = \mathbf{b}$ puede obtenerse usando la inversa de la matriz \mathbf{T} haciendo $\mathbf{x} = \mathbf{bT}^{-1}$. Nótese que escoger un parámetro de prestaciones diferente únicamente afectará a los valores de \mathbf{b} . Por lo tanto, calcular un segundo parámetro sólo incrementará el coste computacional mediante el coste del producto \mathbf{bT}^{-1} , ya que el resto del proceso (especialmente el cálculo de la matriz inversa \mathbf{T}^{-1}) se hace una única vez. De forma similar, se pueden calcular diferentes parámetros de prestaciones con un incremento marginal en el coste computacional usando la factorización LU, puesto que la primera parte del proceso (la factorización, que supone la parte más costosa) se

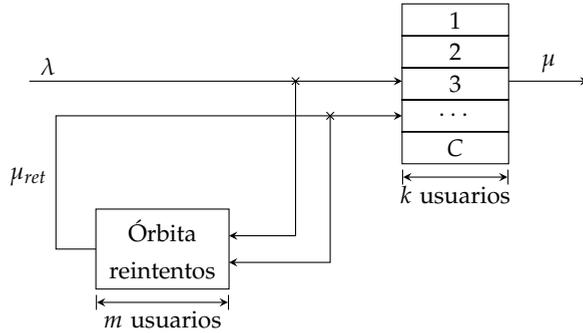


Figura 3.27: Sistema con reintentos sin impaciencia considerado por VE.

realiza una única vez para la matriz **T**.

3.4.3 Aplicación a un escenario sin impaciencia

No todos los métodos propuestos hasta la fecha en la literatura que resuelven sistemas con reintentos consideran el fenómeno de la impaciencia. Por ese motivo, para poder comparar el método propuesto con un mayor grupo de métodos, se va también a considerar el escenario sin impaciencia. Este modelo puede considerarse como una particularización del modelo con impaciencia desarrollado haciendo $P_i = 0$. Así, un usuario reintentará su acceso hasta que obtiene servicio, ya que no se contempla la posibilidad de desistir, tal y como se observa en la Fig. 3.27 y cuyo diagrama de transiciones viene dado en la Fig. 3.28. No se repite todo el proceso de resolución de este modelo puesto que se obtiene haciendo $P_i = 0$ sobre el modelo de la sección anterior. La diferencia más destacable es que ahora ya no tiene sentido la probabilidad de no servicio (P_{ns}), puesto que los usuarios no abandonan el sistema sin obtener servicio.

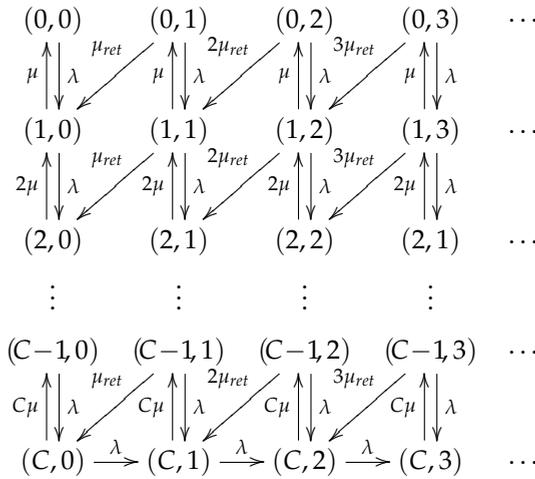


Figura 3.28: Diagrama de transiciones del sistema con reintentos sin impaciencia considerado por VE.

3.4.4 Evaluación de VE

En esta sección se analizan, mediante diferentes resoluciones del sistema propuesto, dos aspectos diferentes de VE. Por una parte, se hace un análisis de diferentes polinomios de ajuste para tratar de conocer cuál es el más adecuado en el problema estudiado. Por otra parte, se analiza el coste computacional del método, haciendo hincapié en la resolución de varios parámetros de mérito simultáneamente.

Considerando la carga del sistema como $\rho = \lambda / (C\mu)$, y mientras no se indique lo contrario, se han estudiado diferentes cargas modificando λ y manteniendo $C = 50$ servidores y $\mu^{-1} = 180$ s. Los reintentos se han configurado con $\mu_r^{-1} = 100$ s y, cuando se considere la impaciencia, $P_i = 0.2$. Aunque únicamente se ha escogido una configuración para la órbita de reintentos, se pueden analizar puntos de funcionamiento dispares modificando en un amplio rango la carga, lo cual producirá diferentes ocupaciones de la

órbita de reintentos.

Al igual que en secciones anteriores, se ha definido el error relativo para el parámetro Ψ ($\Psi \in \{P_b, P_{ns}, N_{ret}\}$) como $\epsilon_\Psi = |\Psi^{approx} - \Psi^{exacto}| / \Psi^{exacto}$. Para obtener una buena estimación del valor de Ψ^{exacto} , se resuelve el sistema con diferentes metodologías (que se explican en la sección 3.4.5) y también con VE incrementando el valor Q hasta que Ψ tenga estables 14 decimales. Como cabe esperar, todos los métodos convergen al mismo valor para cada parámetro de mérito estudiado, $\Psi \in \{P_b, P_{ns}, N_{ret}\}$.

Elección de la función de ajuste

En VE, un parámetro de configuración fundamental es el grado del polinomio de ajuste. Para conocerlo, en las Tablas 3.5, 3.6 y 3.7 se muestra el valor mínimo de Q necesario para obtener un error relativo inferior a 10^{-8} para diferentes parámetros de mérito. VE_x representa el uso de un polinomio de extrapolación de orden x , es decir, que emplea $x + 1$ puntos. Asimismo, el número en negrilla indica el nivel de truncación más bajo para todos los polinomios estudiados. Finalmente, la última fila de la tabla muestra el valor exacto del parámetro estudiado.

Viendo las Tablas 3.5, 3.6 y 3.7 no se aprecia una clara elección en el orden del mejor polinomio de extrapolación. En general, ni los polinomios de orden más bajo ni más alto de los escogidos suponen una buena elección, por lo que se recomiendan los casos intermedios. Además, el hecho de usar VE_x nos obliga a usar un modelo con $Q \geq x$ por la elección de los puntos de ajuste realizada, con lo que conviene evitar polinomios de grados altos. No obstante, debe notarse que el coste computacional es prácticamente independiente del orden del polinomio de ajuste. Como conclusión, para el problema y el escenario de interés y para la precisión relativa que se desea conseguir, se va a emplear VE_8 , ya que representa un balance adecuado entre precisión y mínimo valor de Q requerido. Por lo tanto, en adelante se empleará VE_8 , denotándolo simplemente como VE.

Tabla 3.5: Valor mínimo de Q necesario para obtener errores relativos (ϵ_{P_b}) inferiores a 10^{-8} .

ρ	0.5	0.7	0.9
VE1	20	32	61
VE2	14	31	53
VE3	15	18	48
VE4	12	25	47
VE5	12	24	44
VE6	10	20	41
VE7	7	21	39
VE8	8	17	39
VE9	9	19	38
VE10	10	16	35
VE11	11	18	31
VE12	12	15	40
VE13	13	14	43
VE14	14	23	48
VE15	15	25	56
VE16	16	27	56
P_b	$3.89 \cdot 10^{-6}$	0.0045	0.1353

Tabla 3.6: Valor mínimo de Q necesario para obtener errores relativos ($\epsilon_{P_{ns}}$) inferiores a 10^{-8} .

ρ	0.5	0.7	0.9
VE1	25	41	64
VE2	21	35	58
VE3	19	31	53
VE4	17	30	48
VE5	12	24	44
VE6	14	26	44
VE7	11	24	42
VE8	11	23	36
VE9	10	22	39
VE10	10	21	39
VE11	11	16	37
VE12	12	20	42
VE13	14	19	43
VE14	26	25	48
VE15	15	29	56
VE16	18	29	57
P_{ns}	$6.05 \cdot 10^{-8}$	$1.34 \cdot 10^{-4}$	0.01096

Tabla 3.7: Valor mínimo de Q necesario para obtener errores relativos ($\epsilon_{N_{ret}}$) inferiores a 10^{-8} .

ρ	0.5	0.7	0.9
VE1	22	37	57
VE2	17	32	54
VE3	16	26	50
VE4	14	26	47
VE5	9	18	43
VE6	11	22	39
VE7	8	21	40
VE8	8	19	39
VE9	9	13	34
VE10	10	17	35
VE11	11	18	37
VE12	12	17	42
VE13	13	18	43
VE14	14	24	48
VE15	15	25	56
VE16	28	27	57
N_{ret}	$5.74 \cdot 10^{-5}$	0.09806	4.4789

Cálculo de más de un parámetro de mérito simultáneamente

Uno de los principales inconvenientes del método VE es que únicamente es capaz de calcular un parámetro de mérito cada vez que el sistema se resuelve. Sin embargo, en la sección 3.4.2, se ha esbozado un procedimiento para resolver varios parámetros con un incremento computacional marginal. En la Fig. 3.29 se muestra el tiempo de cálculo⁶ necesario para obtener un número p de parámetros, siendo estos P_b , P_{ns} y N_{ret} . Observando la Fig. 3.29 se puede concluir que el coste computacional apenas se incrementa cuando se calculan parámetros de mérito adicionales.

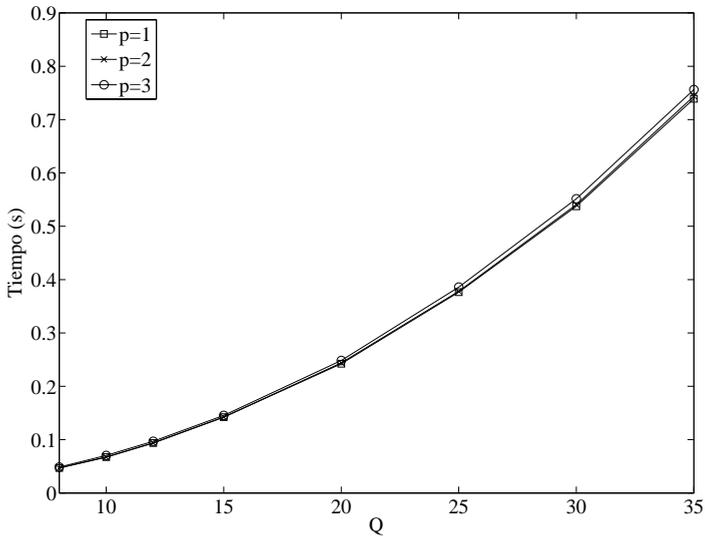


Figura 3.29: Coste computacional de resolver p parámetros de prestaciones simultáneamente con VE.

⁶Los resultados se han obtenido usando Matlab en un Intel Pentium IV 3.2GHz y empleando el método de la factorización LU para resolver el sistema de ecuaciones.

3.4.5 Comparación con otros métodos

En esta sección se compara el método VE con otros métodos propuestos en la literatura y que se basan en la resolución de las probabilidades de estado en régimen permanente usando las ecuaciones de balance. La técnica VE se va a comparar con un método truncado finito como es el método FM, propuesto en [DBGGMBCG05] y ya ampliamente expuesto en la sección 3.2.2. Aunque del método FM se esperan peores prestaciones que de los métodos truncados generalizados que se exponen a continuación, se ha decidido incluirlo para comparar sus prestaciones con otros métodos de resolución. No obstante, no debe olvidarse que la fortaleza del método FM es la versatilidad para aplicarse a sistemas con reintentos más complejos que los expuestos en esta sección como las redes celulares, donde se desean tener en cuenta otros comportamientos adicionales además de los reintentos. Por otra parte, se han considerado tres métodos truncados generalizados. El primero de ellos, propuesto por Falin en [Fal83] y al cual se le abreviará mediante "Fal", considera que a partir de un determinado nivel Q la tasa de reintentos se hace infinita, por lo que a partir de ese nivel el sistema es como una cola $M/M/1$. El segundo, propuesto por Neuts y Rao en [NR90] y el cual se abreviará mediante "NR" restringe el número de usuarios en la órbita de reintentos a partir de un determinado nivel Q , con lo que homogeneiza el sistema, es decir, la tasa de reintentos será $Q\mu_{ret}$ para los estados $m \geq Q$. En [AA02] se prueba la convergencia del modelo NR al modelo original. Finalmente, el tercer método truncado generalizado es el propuesto por Artalejo y Pozo en [AP02]. Este método, al cual se le abreviará mediante "AP" es, hasta donde alcanza el conocimiento del autor, el método más elaborado y con mejores prestaciones de los propuestos hasta la fecha en la literatura. Este método se basa en el empleo de una cola $M/M/2$ a partir de un determinado nivel de ocupación Q de la órbita de reintentos.

La comparación con los citados métodos se realiza en dos escenarios diferentes. En el primero se considera la impaciencia por parte de los usuarios, mientras que en el segundo no se contempla esa opción.

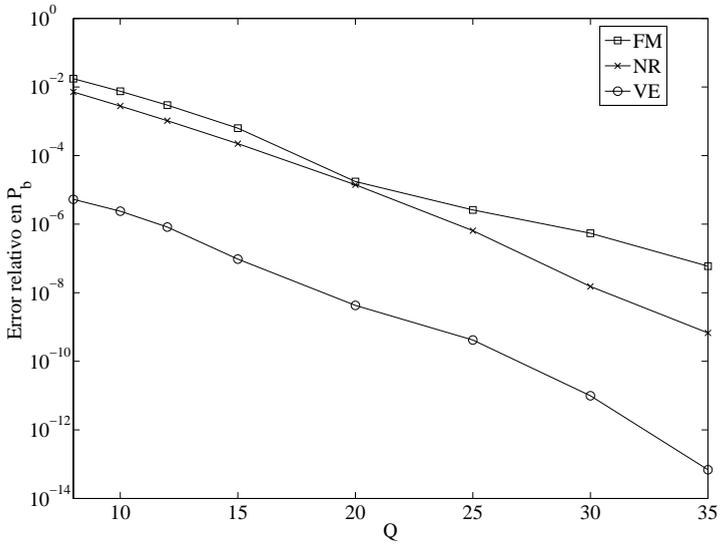
Tabla 3.8: Valores de Q mínimos para obtener errores relativos (ϵ) inferiores a 10^{-8} .

ρ	$\epsilon_{P_b} < 10^{-8}$			$\epsilon_{P_{ns}} < 10^{-8}$			$\epsilon_{N_{ret}} < 10^{-8}$		
	0.5	0.7	0.9	0.5	0.7	0.9	0.5	0.7	0.9
FM	23	39	68	29	46	70	25	42	53
NR	20	31	61	25	41	64	22	38	65
VE8	8	17	39	11	23	36	8	19	39

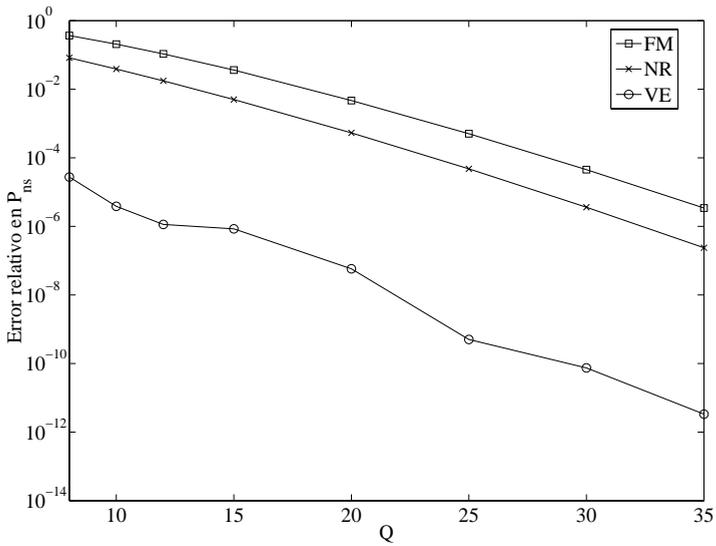
Escenario con impaciencia

En esta sección se comparan las prestaciones del método VE comparado con FM y NR, tanto en términos de precisión como de coste computacional. Nótese que no se ha comparado con los métodos Fal y AP debido a que estos no consideran la impaciencia, por lo que no son directamente aplicables. Aunque el método NR tampoco la considera, dicha extensión es sencilla. El modelo en el cual se ha estudiado y la definición de error relativo empleada son los mismos que los propuestos en la sección 3.4.4. Asimismo, los resultados relacionados con costes computacionales se han obtenido usando Matlab en un Intel Pentium IV 3.2GHz.

En la Tabla 3.8 se muestran los valores mínimos de Q necesarios para obtener un error relativo inferior a 10^{-8} para diferentes parámetros de mérito y para los métodos VE, FM y NR. Los resultados muestran que el método VE mejora ampliamente a los otros métodos, ya que necesita un valor muy inferior de Q para conseguir una determinada precisión en todos los escenarios estudiados y para todos los parámetros de mérito analizados. De forma similar, en las Figs. 3.30 y 3.31 se muestra el error relativo de P_b , P_{ns} y N_{ret} respectivamente cuando $\rho = 0.7$ y para los diferentes métodos estudiados. Los resultados muestran que, para un mismo valor de Q , VE mejora las prestaciones de NR y FM.

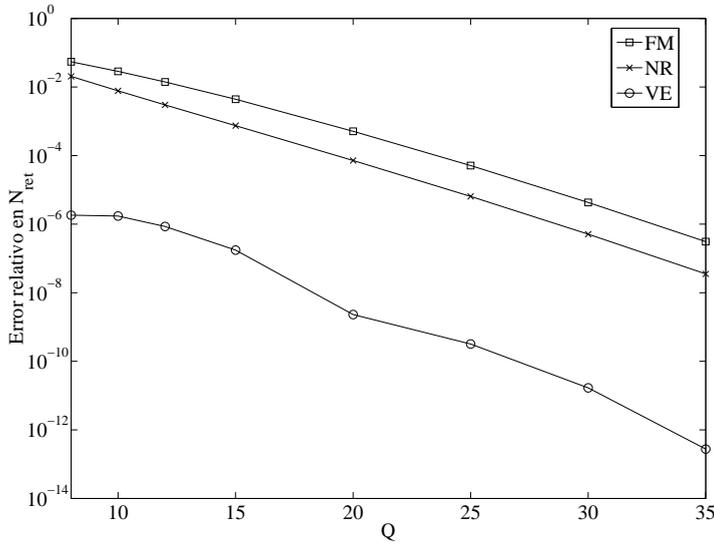


(a) P_b .



(b) P_{ns} .

Figura 3.30: Error relativo para FM, NR y VE en un sistema con impaciencia (I).



(a) N_{ret} .

Figura 3.31: Error relativo para FM, NR y VE en un sistema con impaciencia (II).

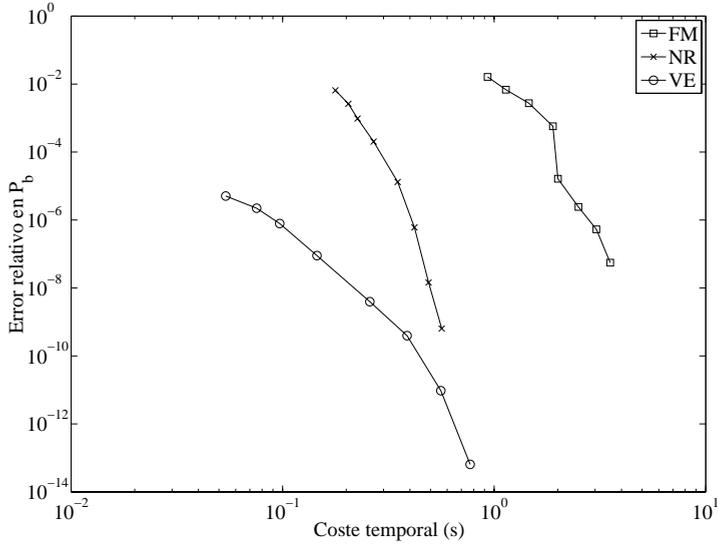
Aunque se ha mostrado que VE mejora claramente a los métodos FM y NR en cuanto a prestaciones, conviene estudiar su coste computacional asociado. En las Fig. 3.32 y 3.33 se muestra el tiempo necesario para alcanzar un determinado error relativo para los diversos parámetros de mérito en estudio y empleando diferentes métodos de resolución. El coste computacional de VE corresponde al cálculo de los tres parámetros mencionados (P_b , P_{ns} y N_{ret}). Nótese también que, aunque se ha obtenido para VE8, la elección de un polinomio de ajuste de orden diferente no alteraría el coste computacional, ya que el sistema de ecuaciones lineales resultante no depende del orden del polinomio. Sin embargo, los resultados deberían interpretarse cuidadosamente, ya que el coste computacional depende en gran medida del algoritmo empleado para resolver el sistema de ecuaciones lineales resultan-

te. Más concretamente, para resolver los sistemas obtenidos en FM y NR se ha hecho uso del eficiente algoritmo propuesto en [GJL84], el cual aprovecha la estructura tridiagonal a bloques del generador infinitesimal. Sin embargo, el sistema de ecuaciones lineal obtenido en VE no tiene dicha estructura tridiagonal, por lo que debe de emplearse un algoritmo más general y, por lo tanto, menos eficiente. En este caso se ha empleado la factorización LU. Como conclusión a las Fig. 3.32 y 3.33 hay que indicar que VE es capaz de obtener una determinada precisión de forma mucho más rápida que el resto de métodos estudiados, por lo que su uso es recomendable para resolver este tipo de sistemas.

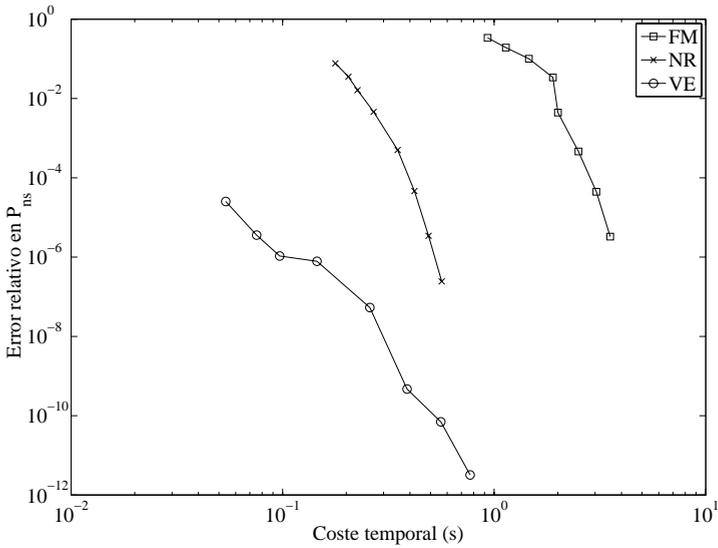
Escenario sin impaciencia

Aunque el escenario sin impaciencia es un caso particular ($P_i = 0$) del escenario que sí la considera, nos permitirá hacer una comparación de VE con un mayor número de métodos. Más concretamente, ahora también se podrá comparar con los métodos Fal y AP. El modelo empleado en esta sección es similar al empleado en la sección 3.4.4, con dos diferencias. Ahora, se ha empleado $C = 10$ en lugar de $C = 50$. Esta elección ha sido motivada por el hecho de que el método AP es costoso desde un punto de vista computacional con los equipos y *software* empleados para su resolución. Por ese motivo se ha preferido reducir la capacidad del sistema. Por otra parte, se han empleado varias tasas de reintentos, $\mu_{ret} = \{0.01, 0.1, 1\} s^{-1}$.

En la Tabla 3.9 se muestran los valores mínimos de Q necesarios para obtener un error relativo inferior a 10^{-8} para la probabilidad de bloqueo cuando se emplean los métodos FM, Fal, NR, AP y VE. Por otra parte en la Fig. 3.34 se muestra la evolución del error relativo para P_b en función del valor de Q . A partir de la Tabla 3.9 y de la Fig. 3.34 se observa como, de entre los métodos aparecidos hasta la fecha en la literatura (sin tener en cuenta VE), AP es el que mejores prestaciones tiene en cuanto a precisión, ya que en algunos casos es comparable a NR y en otros claramente superior. Si se compara el método AP con VE, se puede concluir que VE supera a AP para valores

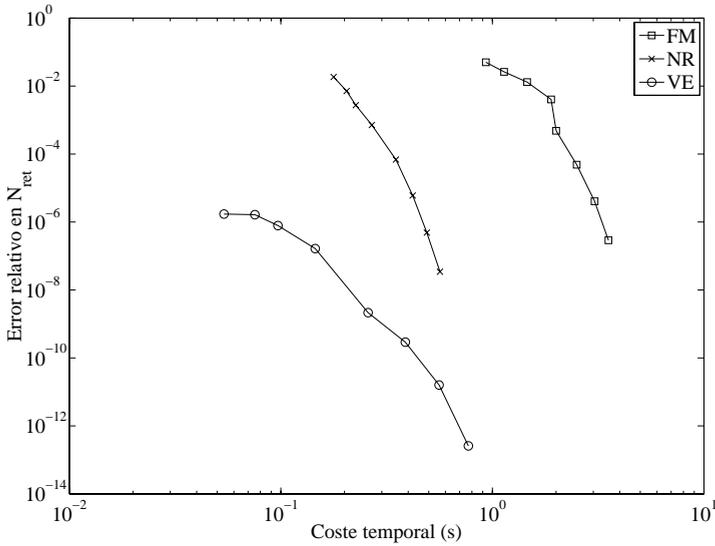


(a) P_b .



(b) P_{ns} .

Figura 3.32: Error relativo en función del tiempo de cálculo en sistema con impaciencia para diferentes métodos (I).

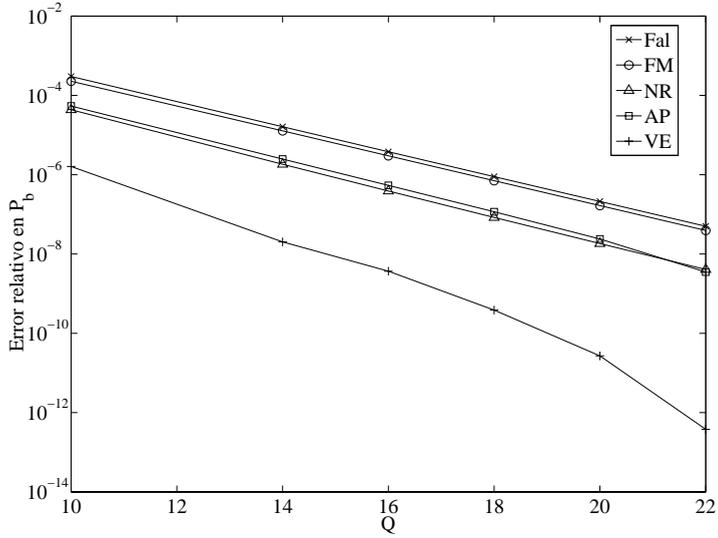


(a) N_{ret} .

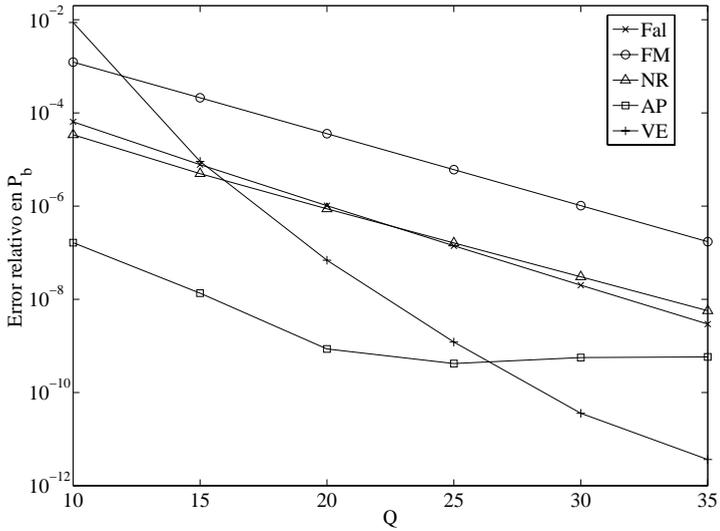
Figura 3.33: Error relativo en función del tiempo de cálculo en sistema con impaciencia para diferentes métodos (II).

bajos de μ_{ret} . Para valores altos de μ_{ret} , las conclusiones no son tan claras, ya que AP supera inicialmente a VE (de hecho, se muestra superior para un error relativo de 10^{-8}), aunque conforme se requieren errores inferiores VE los consigue mejor. También hay que destacar el mal comportamiento de VE para valores muy pequeños de Q y valores altos de μ_{ret} .

Otro aspecto a tener en cuenta es el coste computacional asociado a los métodos propuestos, haciendo la salvedad de que los algoritmos de resolución concretos utilizados en cada caso pueden introducir diferencias importantes en los resultados. Como se ha indicado en la sección referente al escenario con impaciencia, se ha empleado el algoritmo descrito en [GJL84] para los métodos FM, NR y Fal, la factorización LU para VE y el algoritmo descrito en [AP02] para AP. En la Tabla 3.10 se muestra el tiempo necesario



(a) $\mu_{ret} = 0.01, \rho = 0.5$.



(b) $\mu_{ret} = 1, \rho = 0.7$.

Figura 3.34: Error relativo para P_b en función de Q en sistema sin impaciencia para diferentes métodos.

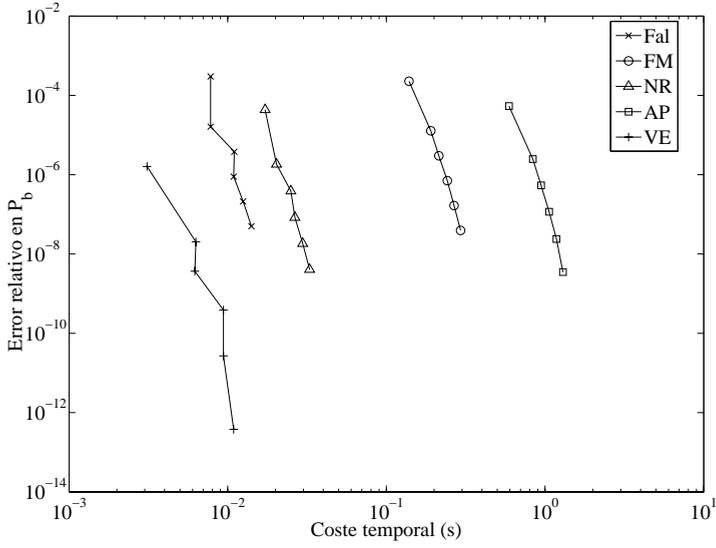
Tabla 3.9: Valor de Q mínimo para obtener errores relativos (ϵ) en P_b inferiores a 10^{-8} en sistema sin impaciencia.

	$\mu_{ret} = 0.01$		$\mu_{ret} = 0.1$		$\mu_{ret} = 1.0$	
	$\rho = 0.5$	$\rho = 0.7$	$\rho = 0.5$	$\rho = 0.7$	$\rho = 0.5$	$\rho = 0.7$
FM	24	43	19	44	21	43
Fal	25	48	21	39	17	32
NR	21	42	18	35	16	34
AP	22	40	15	27	10	16
VE	15	22	15	26	14	23

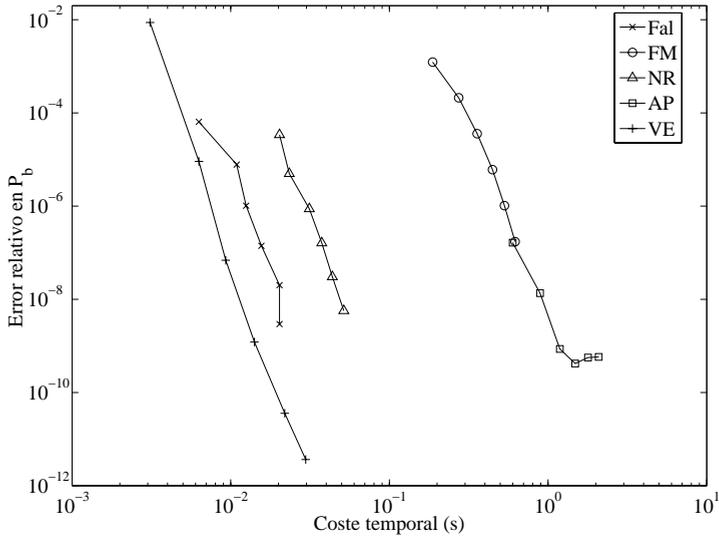
para resolver todos los métodos estudiados con el valor de Q determinado en la Tabla 3.9.

Aunque todos los métodos necesitan un tiempo pequeño para obtener la solución (debido a que se emplean únicamente $C = 10$ servidores), se puede observar como los tiempos que necesita VE son inferiores al resto. Pese a que el método AP necesita los valores más bajos de Q para valores altos de μ_{ret} su coste computacional es elevado. El origen de este elevado coste computacional de AP puede deberse a la lentitud de Matlab para resolver problemas recursivos.

Finalmente, en la Fig. 3.35, se muestra una visión conjunta de la precisión que obtienen los diferentes métodos estudiados para diferentes costes computacionales. Como se puede apreciar, VE asegura una alta precisión con unos tiempos de ejecución mínimos en los dos escenarios extremos propuestos anteriormente.



(a) $\mu_{ret} = 0.01, \rho = 0.5$.



(b) $\mu_{ret} = 1, \rho = 0.7$.

Figura 3.35: Error relativo para P_b en función del tiempo de cálculo en sistema sin impaciencia para diferentes métodos.

Tabla 3.10: Tiempo de cálculo para obtener errores relativos (ϵ) en P_b inferiores a 10^{-8} en sistema sin impaciencia.

	$\mu_{ret} = 0.01$		$\mu_{ret} = 0.1$		$\mu_{ret} = 1.0$	
	$\rho = 0.5$	$\rho = 0.7$	$\rho = 0.5$	$\rho = 0.7$	$\rho = 0.5$	$\rho = 0.7$
FM	0.3158	0.4870	0.2520	0.7620	0.2781	0.7437
Falin	0.0156	0.0265	0.0125	0.0250	0.0094	0.0203
NR	0.0312	0.0422	0.0281	0.0505	0.0234	0.0499
AP	1.1866	1.7264	0.8856	1.5939	0.5921	0.9468
VE	0.0078	0.0125	0.0063	0.0188	0.0063	0.0156

3.5 Conclusiones

En este capítulo se ha considerado el tema de los reintentos en las redes celulares. Para ello, una vez visto que el problema del análisis de este tipo de sistemas se traslada al del desarrollo de metodologías de resolución aproximadas, se ha desarrollado un método eficaz y versátil, denominado FM, para resolver estos sistemas y que supera a la propuesta hecha en [MCL⁺01]. Posteriormente, se ha aplicado FM a modelos celulares más complejos. En el primero de ellos se considera el reintento de los usuarios y también el encolado de las sesiones de *handovers* bloqueadas, además de una política CAS del tipo FGC. En este escenario, se ha demostrado que es suficiente considerar una cola corta para los *handovers*, así como que es necesario considerar los reintentos en el proceso de dimensionado de las redes celulares. En este sentido, se ha visto como el no considerar los reintentos como tales, puede llegar a producir un severo sobredimensionado. En el segundo escenario celular se considera, en vez del encolado de *handovers*, el reintento automático de estos cuando son bloqueados. Se ha estudiado el efecto que tienen los reintentos automáticos para los *handovers* mientras estos permanecen en el área de so-

lape entre células, dando algunas directrices a los operadores de red para configurar este comportamiento de manera óptima. También se ha mostrado que puede emplearse el modelo propuesto para obtener una buena aproximación a la situación más realista que considera un tiempo entre reintentos automáticos y un número máximo de estos deterministas.

Por último, se ha desarrollado un método nuevo y prometedor que es capaz de resolver sistemas con reintentos de una forma muy eficiente, ya que consigue una gran precisión con tiempos de cálculo pequeños. El marco en el que se ha aplicado esta técnica, denominada VE, es al de un sistema $M/M/C$ con un tiempo entre reintentos distribuido exponencialmente, sin incluir las características propias de las redes celulares. La principal característica de este método es que no se basa en el cálculo de las probabilidades de estado en régimen permanente, sino en una nueva métrica denominada *relative state values*, que aparece en las ecuaciones de Howard. Comparando VE con otros métodos propuestos en la literatura, se puede concluir que VE aporta unas excelentes prestaciones tanto en precisión como en coste computacional.

Capítulo 4

Políticas de control de admisión con predicción de movimiento

4.1 Antecedentes

El CAS ha tomado una especial relevancia en el estudio de las redes celulares, debido, en gran parte, a la dificultad existente para garantizar una comunicación ininterrumpida cuando un terminal realiza un *handover* y a la escasez de recursos característico de este tipo de redes. Por este motivo, se han publicado numerosos trabajos relacionados con el tema, citándose algunos de los más significativos en el Capítulo 2.

En las redes celulares es posible estimar el movimiento futuro de los terminales a partir de información como su posición, comportamiento histórico, velocidad, situación en un mapa de carreteras. . . Así, se podrá disponer de un conocimiento anticipado de la ocurrencia de eventos futuros, especialmente de la llegada de *handovers*, que son las peticiones de mayor prioridad. En este capítulo se pretende hacer uso de esa información predictiva en el diseño de políticas CAS. Como se detallará en la sección 4.2.1, existe un buen número de propuestas que predicen los patrones de movimiento de los terminales móviles. Sin embargo, esa información predictiva, o bien no se emplea en el

diseño de políticas CAS, o bien se hace de manera heurística. En este capítulo se pretende llenar ese vacío existente en la literatura utilizando la información predictiva aplicada al CAS desde un punto de vista de optimización. Hasta donde llega el conocimiento del autor, el único artículo que no emplea exclusivamente información local en la optimización de políticas CAS fue publicado por Yener y Rose [YR97] en 1997. En [YR97], los autores emplean un algoritmo genético para calcular políticas CAS cuasi-óptimas que considera no únicamente el estado de la célula definido como el número de sesiones en curso, sino que también emplea el estado de las células vecinas. Dicho trabajo concluye que la ganancia producida al incorporar este tipo de información es insignificante y no compensa la carga de señalización añadida así como la mayor dificultad en el cálculo. Con los métodos desarrollados en la presente tesis hemos alcanzado la misma conclusión. El hecho de que la información de ocupación de los alrededores no sea suficientemente específica motiva el estudio de la ganancia que se puede obtener cuando se dota al sistema de información más específica como es la predicción de movimiento de los terminales, tal y como se hace en el presente capítulo.

El capítulo está estructurado del siguiente modo. En primer lugar, se hace un breve repaso de los esquemas de predicción de movimiento más importantes propuestos en la literatura hasta la fecha y se repasan algunos mecanismos de diseño de políticas CAS propuestos en la literatura que hacen uso de información predictiva, siendo todos ellos heurísticos. Posteriormente se detallan el modelo celular así como los diferentes tipos de información predictiva que se emplean en el presente trabajo. También se repasa la teoría de los procesos de decisión de Markov (MDP), profundizando en técnicas de optimización de este tipo de procesos como son la programación dinámica (DP) y, especialmente, RL. Finalmente, se muestran resultados numéricos para escenarios monoservicio y multiservicio.

4.2 Información predictiva y su aplicación al CAS

4.2.1 Información predictiva en redes celulares

El diseño de esquemas de predicción de movimiento y su aplicación a la predicción de los *handovers* que van a tener lugar en un futuro próximo han sido ampliamente estudiados en la literatura. Los esquemas propuestos podrían clasificarse en tres grandes familias: basados en la historia [LAN97, HF01, YL02, CS02], basados en la localización [CB00] e híbridos [YWL05, SK06, ZK04, SSOZ07].

Esquemas basados en la historia

Intuitivamente, los esquemas basados en la historia se basan en que el comportamiento de un terminal móvil seguirá, con alta probabilidad, un patrón similar al que ha seguido el mismo u otros terminales cuando tienen determinadas características en común. Para este tipo de esquemas, cada estación base recoge información sobre cada terminal móvil como puede ser la célula origen por la que ha llegado a la célula actual, la célula a la que ha ido a continuación, el tiempo que ha estado en la célula... Con esta información, se pueden estimar parámetros como la probabilidad de que una sesión en curso realice un *handover* hacia una determinada célula en un determinado momento. La información puede considerarse de diferentes modos, principalmente de forma particular para cada usuario o bien de forma agregada para todos los usuarios, acumulando así una mayor historia y permitiendo capturar comportamientos que, aunque no haya tenido un usuario, han sido repetidos por otros.

Los ejemplos más significativos y que más impacto han tenido en la literatura relacionada con los esquemas de predicción de movimiento basados en la historia son los propuestos en [LAN97, HF01, YL02, CS02]. En [LAN97] se propone un esquema de predicción de movimiento que introduce el concepto de *shadow cluster*, que se puede definir como el conjunto de células por

las que se estima que el terminal tiene cierta probabilidad de transitar. De este modo, cada terminal móvil informa a su estación base actual acerca de la posición y movimiento que estima que va a seguir. Con esos parámetros, las estaciones base se comunican la información periódicamente y así determinan la cantidad de recursos estimados que van a tratar de acceder a cada célula. De forma similar al concepto de *shadow cluster*, en [HF01] se propone y emplea el concepto de curvas de influencia para caracterizar el impacto que tiene un móvil de una determinada célula en el resto de células. En [YL02] se propone un modelo de predicción de movimiento en el que se estima tanto la probabilidad de ir a una determinada célula como el instante en que esto ocurrirá. La motivación inicial de este trabajo está en la similitud existente entre dos disciplinas diferentes: la compresión de datos y la predicción de movimiento. Por ese motivo, emplea un algoritmo de compresión óptimo (Ziv-Lempel) y lo aplica a la predicción, creando un historial de predicción de movilidad. La conclusión más importante que afecta al presente estudio es que cuando se añade el tiempo a la estimación del destino de un *handover*, se pueden calcular políticas CAS de prestaciones superiores. En [CS02] la predicción se hace cada vez que un terminal abandona una célula a partir de los datos de la cuádrupla: $(T_{event}, prev, next, T_{soj})$, donde T_{event} es el tiempo en el que el terminal sale de la célula, $prev$ y $next$ son las células origen y destino y T_{soj} es el tiempo que ha estado en la célula. El parámetro T_{event} se almacena puesto que se estima que los patrones de movilidad siguen un patrón cíclico con las horas del día, los días de la semana... De este modo se puede estimar fácilmente la probabilidad de visitar una determinada célula y en qué instante de tiempo se espera esa transición.

Esquemas basados en la localización

Los esquemas basados en la historia presentan algunos problemas, siendo el más importante su limitada capacidad de tratar con cambios en los patrones de movimiento. Los esquemas basados en la historia únicamente conocen la posición de cada terminal con una granularidad celular. Sin embargo, se

pueden emplear esquemas que mejoren ampliamente la localización de los terminales dentro de una célula, lo cual permite aportar mejoras en la predicción de movimiento. Los esquemas que permiten localizar un terminal móvil dentro de una célula pueden dividirse en dos categorías [MEBM06]: los métodos terrestres y los asistidos por satélites de posicionamiento.

Aunque dentro de los métodos terrestres existen variadas aportaciones, destacan los métodos basados en la potencia de la señal recibida (RSS, *Received Signal Strength*) y los métodos basados en triangulación por encima de métodos como los basados en el ángulo de llegada (AoA) [SAK⁺92]. En [DMS98] se pueden encontrar otras alternativas así como su posible aplicación a sistemas GSM. Aunque se han empleado en algunas ocasiones [DJKS00, SSOZ07] los métodos RSS no presentan buenas prestaciones debido a la variabilidad de la potencia recibida por efectos como *fast fading* o la propagación multicamino, especialmente cuando no existe visibilidad directa entre el terminal móvil y la estación base. Aunque los métodos basados en triangulación no siempre están disponibles [MEBM06] por requerir tres o más estaciones en línea de visión con el terminal, son las técnicas de localización terrestre más precisas. Dentro de las técnicas de triangulación destacan E-OTD (*Enhanced Observed Time Difference*), estandarizada para las redes GSM/GPRS y su sucesora OTDOA (*Observed Time Difference Of Arrival*) para las redes UMTS. El funcionamiento básico de E-OTD puede encontrarse en [YWL05].

Especial atención merecen los métodos de localización asistidos por satélite, ya que son los que más se han empleado por los esquemas de predicción de movimiento. El gran éxito a nivel comercial de sistemas de posicionamiento como GPS (*Global Positioning System*) ha impulsado el interés investigador de nuevos servicios basados en la localización o en la búsqueda de terminales. La mayoría de receptores GPS de uso comercial tienen un error de menos de 20 metros, pero en breve se esperan mejoras que aumenten la precisión hasta alcanzar un error inferior a 1 metro [Bre00]. En el entorno europeo la Agencia Espacial Europea (ESA) está desarrollando un sistema bajo control civil y similar a GPS denominado Galileo. Este sistema se espera que esté completamente operativo a lo largo de 2008, y su diseño se está realizando para

que sea compatible con GPS, lo que permitirá receptores híbridos de GPS y Galileo con el aumento de precisión que ese hecho conlleva. Por otra parte, también se están desarrollando sistemas que incrementan la precisión de GPS como EGNOS en Europa, WAAS en norteamérica y MSAS en Japón [Bro04]. El uso de todas estas tecnologías se espera que impulse definitivamente el desarrollo de servicios móviles que hagan uso de esta información, especialmente en áreas urbanas, donde se suelen tener mayores problemas por las irregularidades en la propagación de la señal radioeléctrica. La creciente penetración de receptores GPS en los terminales móviles [Zha02] hace ver este sector de manera muy optimista.

De forma paralela al desarrollo de métodos de localización tanto terrestres como por satélite, cada vez existen más bases de datos con información relacionada con trazado de calles, carreteras o núcleos urbanos. El uso de estas técnicas, junto a las técnicas de localización, permite el desarrollo de técnicas de predicción de movimiento de creciente precisión.

Como ejemplo de esquema basado en localización se tiene [CB00] donde se desarrolla un esquema de predicción de movimiento basado en la localización que es independiente del método de localización empleado. Este método se basa en la monitorización de la posición de cada terminal y la extrapolación de su movimiento para estimar cuál será la célula futura que va a visitar el terminal.

Esquemas híbridos

Los esquemas híbridos son los esquemas de predicción de movimiento que emplean tanto información histórica como de localización. El empleo de ambos tipos de información simultáneamente puede incrementar la precisión de estos esquemas sustancialmente. Los esquemas de predicción de movimiento híbridos que más relevancia han tenido en la literatura son [YWL05, SK06, ZK04, SSOZ07]. Antes de repasar los diferentes métodos propuestos hay que destacar que la mayoría son independientes del método de localización empleado, ya que parten de que se dispone de información de localización inde-

pendientemente de si se ha obtenido mediante métodos terrestres o asistidos por satélite. En [YWL05] se emplea un mecanismo de predicción similar al que se emplea en [YL02], aunque ahora se incluye información basada en la localización usando E-OTD en el proceso de predicción de movimiento. Además, no tiene en cuenta únicamente la información del terminal cuando tiene una sesión en curso, sino que acumula también información cuando el usuario no tiene ninguna sesión en curso. En [SK06] se introduce un esquema híbrido de predicción de movimiento que emplea, además de datos históricos, la posición del terminal obtenida usando GPS y la topología de las carreteras. Una base de datos almacena información relacionada con segmentos de calles y carreteras junto con las probabilidades de transición entre segmentos adyacentes (calculado a partir de información histórica), con los tiempos que se han empleado y los *handovers* que se han producido en cada segmento. La información de predicción que se tiene es el tiempo en el que se estima que un *handover* va a entrar y el tiempo en el que se espera se van a liberar recursos. A partir de estos datos, se puede conocer el número de recursos que se van a necesitar en un futuro próximo. Otro aspecto del trabajo presentado en [SK06] es que considera una topología celular bastante general, al permitir células irregulares y con bordes difusos debido a una propagación de la señal interferida por obstáculos, por terrenos irregulares. . . El esquema predictivo que se propone en [ZK04] emplea datos históricos de los terminales para tener una estimación inicial de los futuros movimientos que se van a producir en una célula. Posteriormente, las técnicas de posicionamiento ajustan las predicciones de acuerdo con sus movimientos reales. El esquema monitoriza la probabilidad de que un usuario en una determinada célula vaya a ejecutar un *handover*, así como la probabilidad de que lo produzca hacia una determinada célula. En este esquema, no se asume como en [SK06] que la estación base tiene un conocimiento geográfico exacto, sino que se estima la influencia que la red de carreteras tiene en el patrón de movimiento de los usuarios. Aunque los resultados concluyen que incluir la parte de posicionamiento mejora las prestaciones, los autores también reconocen el aumento de carga de procesamiento y de señalización que conlleva esta inclusión.

El esquema presentado en [SSOZ07] tiene en cuenta el hecho de que no todos los terminales móviles están equipados con GPS, por lo que desarrolla un esquema que tiene en cuenta tanto la localización por medio de GPS como la localización por medio de RSS para los terminales que no disponen de GPS. De este modo, se hace una distinción del funcionamiento según el método de localización empleado. Este esquema, aunque emplea mapas digitales que contienen la estructura de las carreteras, también permite la posibilidad de que los terminales estén fuera de esas carreteras, empleando la historia de otros terminales para determinar las probabilidades de que un usuario vaya de un segmento de carretera a otro.

4.2.2 Aplicación de la información predictiva al diseño de políticas CAS

Partiendo del hecho de que es más molesto para un usuario de una red celular que una sesión en curso finalice abruptamente que se bloquee una petición de nuevo acceso al sistema, los operadores tratan de minimizar la probabilidad de terminación forzosa reservando un determinado número de recursos en cada célula para las peticiones más prioritarias. Puesto que conforme se reservan más recursos el tráfico cursado por la red disminuye, y con ello los ingresos del operador, es importante hacer un balance entre tener una probabilidad de terminación forzosa baja y mantener la utilización del sistema lo más alta posible. De forma intuitiva el conocimiento de lo que va a ocurrir en un futuro nos permitirá gestionar la reserva de un modo más eficiente. Por ese motivo, una de las aplicaciones más inmediatas de la información predictiva expuesta en la sección anterior es la de conseguir políticas de reserva de recursos más eficientes. Sin embargo, hasta donde llega el conocimiento del autor, no existe ninguna referencia que haga un uso óptimo de la información predictiva. Todas las referencias que emplean la información predictiva en el diseño de políticas CAS lo hacen de un modo heurístico. Además, todos los estudios consideran políticas del tipo *guard channel*. En el presente trabajo se propone una metodología de optimización basada en el formalismo de

los MDP y que emplea RL para calcular políticas CAS óptimas (idealmente) o cuasi-óptimas (en la práctica) cuando al controlador de admisión se le suministra información predictiva.

Tal y como se ha dicho, todos los trabajos realizados hasta la fecha incorporan la información predictiva en el cálculo de políticas CAS de forma heurística. En general, el predictor de movimiento informará al controlador de admisión acerca del número de recursos que hay que reservar en el sistema y el controlador de admisión efectuará esa reserva. Por ejemplo, en el esquema propuesto en [CS02] se proponen tres esquemas de CAS que hacen uso de la información predictiva de la que disponen. Estos esquemas son similares, diferenciándose entre sí en qué células de los alrededores se realiza el cálculo de disponibilidad de recursos. Para el caso más sencillo, denominado AC1, si denotamos como BS0 la estación base de la célula en estudio, entonces BS0 envía periódicamente a sus células vecinas la longitud de la ventana de estimación T_{est} que va a ser usada. La estación base vecina i determina para cada sesión en curso m la probabilidad de que haga un *handover* a BS0 en menos de T_{est} unidades de tiempo, probabilidad a la que se denomina $p_h(m, i, 0)$. Entonces, la estación base i calcula el número de recursos que estima que van a hacer un *handover* desde su propia célula a la célula de BS0 sumando para todas las sesiones en curso esas probabilidades ponderadas con el número de recursos que consumen. Por lo tanto, lo único que tiene que hacer BS0 es agregar todas las reservas hechas por sus células vecinas, cantidad a la que se denomina $B_{target}(0)$ y trata de reservar esa cantidad de unidades de recurso. Para limitar la probabilidad de terminación forzosa se emplea un algoritmo de adaptación de T_{est} .

En [HF01] se emplean tres mecanismos heurísticos que emplean la información predictiva para calcular el número de canales que hace falta reservar. Los dos primeros mecanismos consisten en reservar una determinada cantidad de recursos estimada de forma entera y fraccionaria, respectivamente. El tercero incluye una limitación del número de sesiones nuevas que pueden aceptarse para evitar terminaciones forzosas futuras.

Merece la pena comentar el mecanismo CAS que se presenta en [SK06] por las particularidades debidas a la información predictiva que emplea. En [SK06], el esquema de predicción es capaz de predecir tanto el número de *handovers* entrantes que van a tener lugar en un instante como el de los que van a salir de la célula en estudio. Los autores justifican este hecho porque considerando únicamente los *handovers* entrantes se podrían reservar, cuando se hace de forma heurística, más recursos de los necesarios, ya que durante el tiempo transcurrido desde que el *handover* se predice y se reservan los recursos hasta que ocurre pueden haberse producido salidas de la célula liberando algunos recursos y haciendo la reserva innecesaria. Para calcular la política CAS se siguen los siguientes pasos. En BS0, se emplea el siguiente algoritmo, descrito de forma simplificada. Inicialmente se hace $B_{target}(0) = 0$ para luego situar en una línea temporal los instantes de tiempo en los cuales se predicen las entradas y salidas de *handovers* que se estima van a tener lugar en un tiempo inferior a $T_{threshold}$. Avanzando hacia el futuro y hasta el final de la ventana temporal se incrementa $B_{target}(0)$ cada vez que se encuentra un *handover* de entrada con la cantidad de recursos demandados por esa sesión. Por otra parte, cada vez que se encuentra un *handover* de salida se disminuye $B_{target}(0)$ con la cantidad de recursos que se liberan. El número de recursos que se le pide al controlador de admisión que reserve será el máximo valor que tome $B_{target}(0)$ durante el proceso descrito. Al igual que en [CS02], $T_{threshold}$ se ajusta para limitar la probabilidad de terminación forzosa. El CAS en BS0 se puede realizar de diferentes formas, siendo la más sencilla la siguiente: aceptar una nueva sesión que requiere b_n unidades de recurso si $C(0) - C_o(0) - B_{target}(0) \geq b_n$ y rechazarla en caso contrario, donde $C(0)$ es el número total de unidades de recurso y $C_o(0)$ es el número de recursos ocupados, ambos referidos a BS0. Los *handovers* se aceptan mientras hayan recursos disponibles. Nótese que tanto en [CS02] como en [SK06] $B_{target}(0)$ es el objetivo de reserva, no la reserva real, puesto que es posible que no existan suficientes recursos libres en un determinado momento para realizar la reserva.

4.3 Descripción del modelo empleado

4.3.1 Modelo celular

Como modelo del sistema celular, se considera una única célula y sus inmediaciones, donde la célula tiene un total de C unidades de recurso, siendo su significado físico dependiente de la implementación tecnológica de la interfaz radio. Las inmediaciones disponen de una capacidad de C_p unidades de recurso. Se empleará un valor grande para C_p de modo que no tenga un impacto significativo en los resultados. Por simplicidad, y de cara a relacionar ciertos parámetros del sistema, se considera que la célula en estudio tiene forma circular con radio R y que las inmediaciones tienen forma de disco con radio interno (externo) de valor R ($1.5R$). Se ofrecen un total de N servicios diferentes. Para cada servicio, hay dos flujos de llegadas: de nuevas sesiones y de *handovers* de otra célula. Por tanto, hay N servicios y $2N$ tipos de llegadas diferentes. Asimismo, se han considerado aplicaciones que presentan periodos de actividad (sesiones) durante los cuales ocuparán una determinada cantidad de recursos, a la que se denomina b_i ($1 \leq i \leq N$). El modelo celular se puede ver en la Fig. 4.1.

Por tratabilidad matemática, se asume que los procesos de llegada son de Poisson y que los tiempos de residencia y de duración de las sesiones están distribuidos exponencialmente. Aunque estas aproximaciones están ampliamente aceptadas en la literatura, pueden no ser adecuadas, aunque tampoco existe unanimidad en su distribución más apropiada (véase la discusión sobre el tema realizada en el capítulo 2.1.3). En cuanto a los procesos de llegada, no hay mucha discusión en cuanto a la distribución que siguen, ya que para el de nuevas sesiones se asume en casi todos los trabajos que es de Poisson. Aunque el proceso de llegada de *handovers* puede no ser de Poisson, en [CL95] se determina que sí que lo es cuando no hay bloqueo y que cuando hay bloqueo la aproximación poissoniana es adecuada. En cualquier caso, en el sistema en estudio se considerarán probabilidades de bloqueo bajas, por lo que parece adecuado el uso de llegadas de *handovers* poissonianas. Más delicada es la

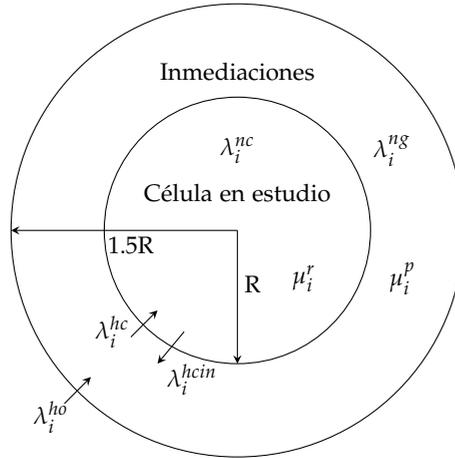


Figura 4.1: Modelo celular del sistema.

caracterización de los tiempos de residencia y de ocupación del canal. Por ello, y aunque en la mayoría de experimentos se emplean tiempos de residencia distribuidos exponencialmente, se ha evaluado la sensibilidad de los resultados respecto a la distribución del tiempo de residencia.

Los parámetros necesarios para caracterizar los tiempos de duración de las sesiones y de residencia en las diferentes zonas del sistema son:

- Tiempo de ocupación de los recursos en la célula central para el servicio i (μ_i).
- Número medio de *handovers* que realiza una sesión del servicio i en la célula central cuando se dispone de un número de recursos infinitos (N_i^h).

Si consideramos estos dos parámetros distribuidos exponencialmente, para calcular los parámetros que definen las distribuciones exponenciales del tiempo de duración de las sesiones (μ_i^s) y del tiempo de residencia (μ_i^r) empleamos las siguientes relaciones. Por una parte, el número medio de *handovers*

vers por sesión viene dado por el cociente:

$$N_i^h = \frac{\mu_i^r}{\mu_i^s}.$$

Además, el tiempo medio de ocupación de los recursos es el tiempo mínimo entre el de residencia y el de duración, siendo el mínimo entre dos distribuciones exponenciales otra distribución exponencial cuya tasa es la suma de sus tasas. Por lo tanto,

$$\mu_i = \mu_i^r + \mu_i^s.$$

A partir de estas dos ecuaciones se puede calcular tanto el tiempo de residencia en la célula como el tiempo de duración de la sesión mediante:

$$\mu_i^s = \frac{\mu_i}{1 + N_i^h}, \quad \mu_i^r = N_i^h \mu_i^s.$$

En el caso de células hexagonales y considerando una célula dada y sus seis células vecinas, se puede denotar mediante $f_p(t)$ a la función densidad de probabilidad del tiempo que un terminal reside en el anillo de las seis células rodeando una célula dada, mediante $f_r(t)$ la función densidad de probabilidad del tiempo que un terminal reside en una célula y por $f_p^*(s)$ y $f_r^*(s)$ sus respectivas transformadas de Laplace. A partir de criterios geométricos, si consideramos que un cuando un terminal sale de una de las células del anillo lo hace con una probabilidad de $2/6$ hacia otra célula del anillo (y con la complementaria sale del anillo) se cumple que $f_p^*(s) = \sum_{k=0}^{\infty} f_r^*(s) (2/6)^k (4/6)$. Cuando el tiempo de residencia en la célula $f_r(s)$ esté distribuido exponencialmente con tasa μ_i^r entonces $f_r^*(s) = \mu_i^r / (\mu_i^r + s)$ y se obtiene $f_p^*(s) = (4\mu_i^r/6) / ((4\mu_i^r/6) + s)$. Por lo tanto, $f_p(t)$ también está distribuida exponencialmente con tasa $(4\mu_i^r/6)$. Por ese motivo y, aunque en nuestro modelo el vecindario considerado es sólo una pequeña zona alrededor del perímetro de la célula en estudio, se ha aproximado la distribución de su tiempo de residencia mediante una distribución exponencial, empleándose una tasa de valor

$$\mu_i^p = 2\mu_i^r,$$

de forma similar a como se hace en [SCZ07], donde se emplea una distribución exponencial para describir el tiempo de residencia en la zona con forma de anillo más alejada del centro de la célula en estudio.

Para definir todas las tasas de generación de sesiones nuevas y de *handover* es necesario conocer:

- Tasa total de generación de sesiones nuevas en la célula en estudio (λ_T).
- Factor de penetración de cada servicio ($f_i, i \in N, f_i \in [0, 1]$). Debe además cumplirse que $\sum_{i=1}^N f_i = 1$.

La tasa de generación de sesiones nuevas en la célula para cada servicio se puede calcular haciendo:

$$\lambda_i^{nc} = f_i \lambda_T, \text{ siendo } 1 \leq i \leq N.$$

La tasa de generación de sesiones nuevas en las inmediaciones se ha calculado a partir de la relación de áreas respecto a la célula en estudio. Es decir,

$$\lambda_i^{ng} = \frac{\pi(1.5R)^2 - \pi R^2}{\pi R^2} \lambda_i^{nc} = 1.25 \lambda_i^{nc}, \text{ siendo } 1 \leq i \leq N.$$

No es necesario definirle al modelo de simulación las tasas de *handovers* que entran y salen de la célula central así como las que abandonan las inmediaciones, ya que esos flujos forman parte del modelo de simulación y son generados a partir del funcionamiento del mismo. Sin embargo, sí que hay que definir la tasa de *handovers* entrantes desde el exterior del sistema a las inmediaciones. La tasa de llegadas de *handovers* desde el exterior del sistema (λ_i^{ho}) hasta las inmediaciones se relaciona con la tasa de salida de *handovers* desde la célula en estudio (λ_i^{hc}) mediante sus perímetros, de modo que

$$\lambda_i^{ho} = 1.5 \lambda_i^{hc}, \text{ siendo } 1 \leq i \leq N.$$

La tasa de *handovers* saliente de la célula en estudio puede calcularse como:

$$\lambda_i^{hc} = \frac{\mu_i^r}{\mu_i^r + \mu_i^s} \left[(1 - P_i^n) \lambda_i^{nc} + (1 - P_i^h) \lambda_i^{hcin} \right],$$

siendo P_i^n y P_i^h las probabilidades de pérdidas de sesiones nuevas y de *handovers*, respectivamente.

A partir del equilibrio de los flujos entrantes y salientes, se puede decir que $\lambda_i^{hc} = \lambda_i^{hcin}$, por lo que

$$\lambda_i^{hc} = \frac{\mu_i^r}{\mu_i^r + \mu_i^s} \left[(1 - P_i^n) \lambda_i^{nc} + (1 - P_i^h) \lambda_i^{hc} \right] = \frac{(1 - P_i^n)}{P_i^h + \frac{\mu_i^s}{\mu_i^r}} \lambda_i^{nc}. \quad (4.1)$$

Como resulta más interesante conocer la expresión en función de la probabilidad de terminación forzosa (P_i^{tf}), se puede escribir esta como

$$P_i^{tf} = \frac{\frac{\mu_i^r}{\mu_i^r + \mu_i^s} P_i^h}{1 - \frac{\mu_i^r}{\mu_i^r + \mu_i^s} (1 - P_i^h)} = \frac{P_i^h}{\frac{\mu_i^s}{\mu_i^r} + P_i^h}.$$

Con lo que

$$P_i^h = \frac{P_i^{tf}}{1 - P_i^{tf}} \frac{\mu_i^s}{\mu_i^r}. \quad (4.2)$$

Sustituyendo la ecuación 4.2 en la ecuación 4.1 queda:

$$\lambda_i^{hc} = \frac{\mu_i^r}{\mu_i^s} (1 - P_i^n) (1 - P_i^{tf}) \lambda_i^{nc}.$$

Para valores de probabilidad de pérdidas de sesiones nuevas y de terminación forzosa de *handovers* bajas ($P_i^n \leq 1\%$ y $P_i^{tf} \leq 0.1\%$), se puede hacer la aproximación siguiente, que ha sido la empleada en las simulaciones

$$\lambda_i^{hc} = 0.989 \frac{\mu_i^r}{\mu_i^s} \lambda_i^{nc}.$$

4.3.2 Información predictiva considerada

En el presente trabajo se trata de evaluar la mejora de prestaciones que se puede alcanzar al emplear información predictiva en el proceso de cálculo

de políticas CAS óptimas. Puesto que el objetivo no es el desarrollo de esquemas de predicción de movimiento, se va a emplear un modelo genérico que capture, de algún modo, las aportaciones en este campo que se han descrito en la sección anterior. *Grosso modo*, todos los esquemas de predicción aparecidos en la literatura son capaces de estimar los *handovers* que van a entrar en la célula en estudio próximamente. Sin embargo, el tipo de información predictiva que se va a considerar en este trabajo está inspirado en el esquema propuesto en [SK06], ya que es el esquema predictivo que proporciona una información más completa. Además del número de *handovers* que se estima van a llegar en un futuro próximo, estima el número de sesiones que van a salir de la célula así como los instantes en los que se estiman esos *handovers* entrantes y salientes.

Con esta motivación, se pueden describir los diferentes tipos de predicción que se han evaluado. Para cada tipo de predicción se ha diseñado un agente predictor (AP), que es el elemento encargado de etiquetar cada sesión en función de si se estima que va a realizar un *handover* o no. Finalmente, hay que indicar que aunque se analizan las diferentes fuentes de predicción por separado, también se harán análisis conjuntos.

Predicción estocástica

***Handovers* entrantes:**

Dado que el objetivo de nuestro estudio no es el diseño de un AP sino el uso de la información que este proporciona, se utilizará un modelo de este, que se describe a continuación. El AP de *handovers* entrantes o, simplemente, AP de entrada informa en todo momento al controlador de admisión acerca del número de terminales activos en las proximidades de la célula en estudio que se prevé van a realizar un *handover* hacia esta, asumiendo que sólo una sesión puede estar activa para cada terminal móvil.

En el modelo considerado se tiene en cuenta que la clasificación de los terminales activos que probablemente van a producir un *handover* (H) y los que probablemente no lo harán (NH) no es totalmente precisa, sino que posee

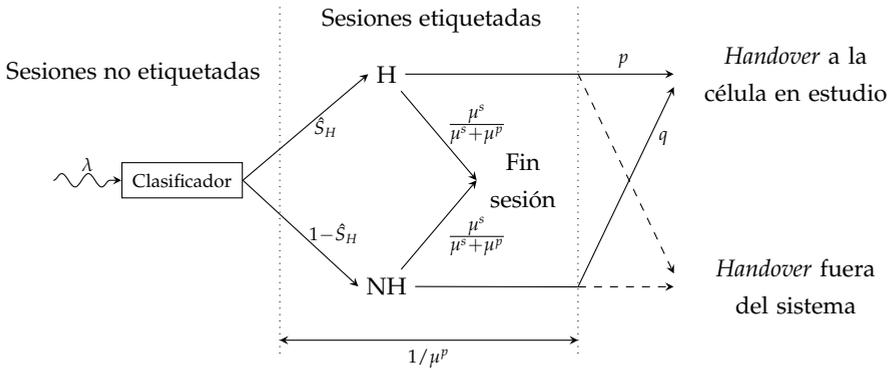


Figura 4.2: Modelo del AP de entrada.

cierto error modelado mediante las probabilidades de no detección y falso positivo.

En el momento en el que un terminal activo entra en las inmediaciones de la célula o uno que ya lo estaba pasa a estar activo, el AP lo clasifica como H o NH atendiendo a las características del terminal (posición, velocidad, trayectoria, perfil histórico...) y otra información (mapa de calles y carreteras, hora del día...). Tras un tiempo aleatorio, que en este modelo sigue una distribución exponencial mientras no se indique lo contrario, el destino final se concreta y bien acaba produciéndose el *handover* o esta posibilidad se descarta definitivamente, por ejemplo porque la sesión termina o porque el terminal se desplaza a otra célula.

El modelo del AP de entrada se caracteriza mediante tres parámetros: el tiempo medio desde que se realiza la predicción hasta que esta predicción se concreta, es decir, el tiempo de residencia en las inmediaciones $1/\mu_i^p$, la probabilidad p de provocar un *handover* si el terminal se ha etiquetado como H y la probabilidad q de provocar un *handover* si el terminal se ha etiquetado como NH. Nótese que en general $q \neq 1 - p$. El funcionamiento básico del AP de entrada se muestra en la Fig. 4.2 donde se ha prescindido por simplicidad

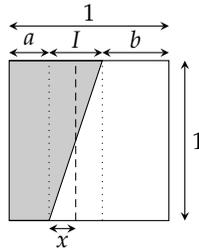


Figura 4.3: Incertidumbre en la predicción.

en la notación del subíndice perteneciente al número de servicio.

Los valores de p y q están relacionados a través del modelo de la Fig. 4.3, donde se muestra un cuadrado de superficie unidad que representa la población de los terminales que van a ser clasificados por el AP. El área sombreada representa la fracción de los terminales que finalmente realizarán un *handover* (S_H) y el área no sombreada el resto de terminales. El clasificador fija un umbral (representado mediante una línea discontinua vertical en la figura) que utiliza para discriminar entre aquellos terminales que probablemente realizarán un *handover* (a la izquierda de la línea, \hat{S}_H) y los que no (a la derecha de la línea). Como se aprecia en la figura, existe una zona de incertidumbre (I) que se representa mediante la línea oblicua de separación entre las zonas sombreada y no sombreada. Aunque por sencillez se ha utilizado un modelo lineal para la zona de incertidumbre, sería inmediato considerar un modelo diferente. El parámetro x representa la posición relativa del umbral del clasificador. Por defecto, a lo largo de el presente trabajo se ha empleado siempre $x = I/2$. Esta incertidumbre es la causante de los errores de clasificación: la zona triangular no sombreada a la izquierda del umbral (falso positivo, \hat{S}_H^e) y el triángulo sombreado a la derecha del umbral (no detección, \hat{S}_{NH}^e).

A partir de la Fig. 4.3 se puede obtener:

$$1 - p = \frac{\hat{S}_H^e}{\hat{S}_H} = \frac{x^2}{2I(a+x)},$$

$$q = \frac{\hat{S}_{NH}^e}{1 - \hat{S}_H} = \frac{(I-x)^2}{2I(1-a-x)}.$$

Los parámetros a y b pueden expresarse en función de la fracción de terminales móviles que realizarán un handover a la célula en estudio y del grado de incertidumbre en la predicción I ,

$$a = S_H - I/2, \quad b = 1 - S_H - I/2,$$

y, por tanto,

$$1 - p = \frac{\hat{S}_H^e}{\hat{S}_H} = \frac{x^2}{I(2S_H - I + 2x)},$$

$$q = \frac{\hat{S}_{NH}^e}{1 - \hat{S}_H} = \frac{(I-x)^2}{I(2 - 2S_H + I - 2x)}.$$

Omitiendo el índice relativo al número de servicio por simplicidad, la tasa de entrada de sesiones al clasificador λ se escoge de modo que el sistema esté en equilibrio estadístico, es decir, la tasa de entrada de *handovers* a la célula ($\lambda^{h,in}$) es igual a la tasa de salida de *handovers* ($\lambda^{h,out}$). Siendo P^n (P^h) la probabilidad de bloqueo de sesiones nuevas (*handovers*), y P^{tf} la probabilidad de terminación forzosa se puede escribir

$$\lambda^{h,in} = \lambda S_H \frac{\mu^p}{\mu^p + \mu^s},$$

$$\lambda^{h,out} = \frac{\mu^r}{\mu^r + \mu^s} [(1 - P^n)\lambda^{nc} + (1 - P^h)\lambda^{h,in}]. \quad (4.3)$$

Forzando $\lambda^{h,in} = \lambda^{h,out}$ y sustituyendo P^h por

$$P^h = \frac{P^{tf}}{1 - P^{tf}} \cdot \frac{\mu^s}{\mu^r},$$

se obtiene

$$\lambda = (1 - P^n)(1 - P^{tf})\lambda^{nc} \left(\frac{\mu^r}{\mu^s} + \frac{\mu^r}{\mu^p} \right) \frac{1}{S_H}.$$

Asimismo, para determinar el porcentaje de sesiones de las que realizan un *handover* que lo hacen hacia la célula en estudio (S_H) se ha empleado un criterio geométrico. A partir de la Fig. 4.1 y por relación de perímetros se puede determinar que un 40 % de la sesiones que salen de las inmediaciones lo hacen hacia la célula en estudio. Esto es,

$$S_H = \frac{2\pi R}{2\pi R + 2\pi(1.5R)} = 0.4.$$

Handovers salientes:

La tarea de informar al algoritmo de CAS acerca del número de sesiones que se prevé van a realizar un *handover* hacia el exterior la llevará a cabo un nuevo elemento al que se denomina AP de salida, cuyo modelo se presenta en la Fig. 4.4. De una manera similar a lo que ocurría con el AP de entrada, el AP de salida etiquetará las sesiones activas en función de si van a abandonar la célula (H^{out}) o no (NH^{out}), no estando esta clasificación exenta de errores, sino que, al igual que en el caso anterior, el error se modelará con las probabilidades de no detección y falso positivo.

La clasificación se hace cuando un terminal móvil activo entra en la célula en estudio o cuando un terminal, que ya está en la célula, pasa a estar activo. A diferencia del AP de entrada, el modelo del AP de salida se caracteriza únicamente mediante los parámetros p y q , cuyo significado es el mismo que en el AP de entrada, ya que el tiempo desde que se realiza la predicción hasta que se concreta, viene definido por el tiempo de ocupación de los recursos, que se considera distribuido exponencialmente.

Los valores de p y q están relacionados mediante el mismo modelo que se tenía para el AP de entrada, es decir, el descrito en la Fig. 4.3, habiéndose tomado también en todos los casos $x = I/2$. En el caso del AP de salida, el

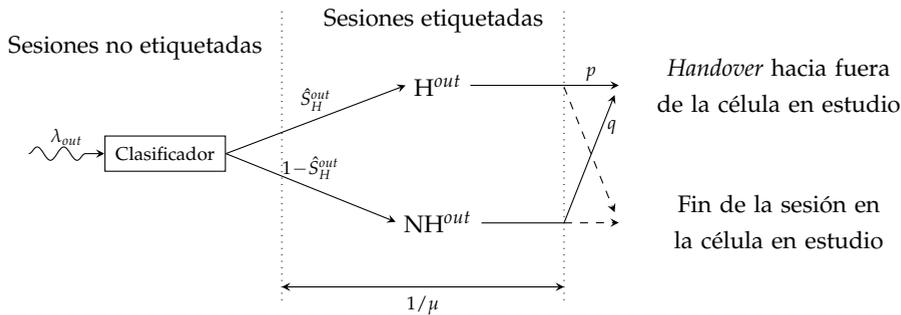


Figura 4.4: Diagrama de funcionamiento del AP de salida.

porcentaje de sesiones que efectivamente realizan un *handover* hacia el exterior de la célula (S_H^{out}) viene ahora determinado por la siguiente relación

$$S_H^{out} = \frac{\mu_r}{\mu_s + \mu_r} = \frac{N_h}{N_h + 1}.$$

Predicción determinista

Los modelos de agente predictor introducidos hasta el momento no predicen los instantes en los que se van a producir los *handovers*, por lo que se les ha englobado dentro de la categoría de predicción estocástica. En esta sección se considera que el esquema de predicción es capaz de conocer no el número de *handovers* futuros sino cuántos se producirán en un tiempo inferior a T , a lo que hemos denominado predicción determinista. Dicho de otra forma, si analizando el patrón de movimiento del usuario se estima que va a realizar un *handover* en menos de T unidades de tiempo se realiza el correspondiente etiquetado del terminal para informar al controlador de admisión. Intuitivamente, parece obvio que tiene más relevancia para el sistema CAS el hecho de que el *handover* se vaya a producir de manera inminente que el hecho de que este ocurra en un tiempo futuro indeterminado. En este sentido, la predicción estocástica puede considerarse como un caso límite de la predicción

determinista cuando $T \rightarrow \infty$. La predicción determinista puede aplicarse a la predicción de *handovers* entrantes, salientes y de ambos a la vez.

4.4 Procesos de decisión de Markov y aprendizaje reforzado

Tal y como se ha visto, hasta la fecha no existen trabajos relacionados con el diseño de políticas CAS óptimas que hagan uso de información de predicción de movimiento. Además, siempre se asume que la política CAS óptima es del tipo *guard channel*. En esta sección se analiza el marco teórico de la solución de optimización escogida: el aprendizaje reforzado (*reinforcement learning*, RL). Los fundamentos de RL se encuentran tanto en los procesos de decisión de Markov (MDP) como en la programación dinámica (DP), por lo que previamente se repasan esas disciplinas. En el capítulo 3.4 ya se realizó una muy breve introducción a los MDP. Sin embargo se ha preferido repetir algunas ideas y ampliar otras en este apartado para motivar y comprender mejor los fundamentos de la metodología de trabajo empleada a lo largo del presente capítulo.

4.4.1 Procesos de decisión de Markov (MDP)

Cuando a un proceso de Markov se le añade la capacidad de elegir determinadas acciones en los distintos estados con el fin de tener un control sobre el mismo, se tiene un proceso de decisión de Markov. Un MDP puede definirse mediante la tupla $\{\mathcal{S}, \mathcal{A}, \mathcal{P}, \mathcal{W}\}$, cuyos elementos pueden definirse como:

- Conjunto de estados (\mathcal{S})

El estado de un sistema es un parámetro o conjunto de parámetros que pueden emplearse para describir un sistema.

- Conjunto de acciones (\mathcal{A})

Las acciones son el conjunto de posibles decisiones que se pueden tomar en cada estado del sistema. Asimismo, el término *política* se refiere a la estrategia de selección de acciones en cada estado. Si en cada estado se determina cuál es la acción que debe realizarse de forma determinista, a esa política se le denomina *determinista*. Por contra, cuando este hecho no se cumple, se tienen políticas no deterministas o aleatorizadas. Por otra parte, una política se dice que es markoviana si únicamente depende del estado actual y no de estados anteriores. Además, una política es estacionaria si no depende del tiempo. Para todos los problemas considerados en este capítulo se han considerado únicamente políticas estacionarias, deterministas y markovianas.

- Probabilidades de transición entre estados (\mathcal{P})

La definición de \mathcal{P} especifica el funcionamiento del sistema, ya que determina la probabilidad de ir desde un determinado estado x a otro y al realizar la acción a . Es decir, especifica las posibles consecuencias de tomar una acción en un determinado estado. Así, al cumplir la propiedad de Markov, se tendrá:

$$P_{xy}^a = Pr \{x_{t+1} = y | x_t = x, a_t = a\}.$$

- Función de costes (\mathcal{W})

La función de coste \mathcal{W} determina, dada la tupla (x, a, y) , el coste de haber tomado en el estado x la acción a y haber llegado al estado y . Debe notarse que el valor puede no ser determinista. Al cumplirse la propiedad de Markov, se tiene:

$$W_{xy}^a = E \{\omega_{t+1} | x_t = x, a_t = a, x_{t+1} = y\}.$$

En el presente trabajo únicamente se consideran problemas en los que \mathcal{S} y \mathcal{A} son finitos, por lo que la parte teórica se restringe a esos casos.

Puesto que cada vez que se toma una acción se tiene un coste asociado a ella, conforme evolucione el sistema se irán acumulando los costes totales del

proceso. El principal objetivo de modelar el comportamiento de un sistema mediante un MDP es para ser capaces de determinar la política óptima que minimiza¹ una determinada función coste. La acumulación de costes de un proceso con horizonte infinito puede tener un resultado no acotado, por lo que se han dado diversas soluciones a este problema. Como primera solución, se ha introducido el factor de descuento (β). De este modo, la suma

$$\lim_{N \rightarrow \infty} E \left(\sum_{t=0}^{N-1} \beta^t \omega_t \right),$$

estará acotada cuando $\beta < 1$, donde ω_t es el coste obtenido en el instante t . Sin embargo, el uso de factores de descuento implica preferencia por las acciones más próximas en el tiempo, por lo que habitualmente se ha empleado en problemas relacionados con la economía, donde el instante en el que se obtengan los beneficios puede llegar a ser determinante, pero puede no ser adecuado para la optimización de otro tipo de problemas, como el que nos ocupa.

La segunda solución, que ha sido la escogida en el presente trabajo, se basa en emplear costes medios en sentido temporal (*average cost*), de forma que

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} E \left(\sum_{t=0}^{N-1} \omega_t \right),$$

está acotado. Aunque los métodos de coste medio parecen más adecuados para el diseño de políticas CAS, los métodos basados en descuento [CN99, TB00, SBP04, YWL06] han sido los más comúnmente empleados. Uno de los primeros estudios detallados relativos al coste medio es [Mah96].

Al igual que se hizo en el capítulo 3.4, se pueden definir los *relative state values* del sistema como el coste esperado acumulado sobre un horizonte temporal infinito cuando el sistema empieza en el estado x en comparación

¹La teoría desarrollada en este capítulo es aplicable tanto para la minimización como la maximización de funciones de coste o de beneficios, respectivamente. Puesto que en el caso que nos ocupa se trata de minimizar una función coste, se hablará de minimización, aunque es fácilmente aplicable a maximizaciones de beneficios.

con el obtenido cuando la recompensa en todos los estados es la media del todo el proceso, γ^π . Es decir,

$$v(x) = \lim_{N \rightarrow \infty} E \left[\sum_{t=0}^{\infty} (\omega_t - \gamma^\pi) \mid X(t_0) = x \right]. \quad (4.4)$$

Además de los *relative state values* (también llamados *state values*), en ocasiones se emplean los denominados *state-action values* cuyo significado es similar con la diferencia de que los *state-action values* representan el mismo coste relativo pero al tomar una determinada acción en un determinado estado, por lo que existe uno para cada par estado-acción. La notación habitual para los *state-action values* es $Q(x, a)$.

Para la optimización de MDP con el criterio de coste medio y para tiempos entre instantes de decisión aleatorios [SPS99] se cumplen las siguientes ecuaciones de Bellman (*Bellman optimality recurrence equations*)

$$v^*(x) = \min_a \left(\omega(x, a) - \gamma^* \tau(x, a) + \sum_y P_{xy}^a v^*(y) \right),$$

donde $\omega(x, a)$ es el coste medio entre x e y al tomar la acción a , $\tau(x, a)$ es el tiempo medio transcurrido desde que se tomó la decisión a en el estado x hasta el instante de la siguiente decisión, $v^*(y)$ es el coste medio de tomar la acción óptima en y y, a partir de ese momento seguir tomando las acciones de forma óptima y γ^* es el coste medio de la política óptima por unidad de tiempo. Intuitivamente, las ecuaciones de Bellman definen que los *relative state values* de la política óptima ($v^*(x)$) deben ser iguales al coste esperado en ese estado y luego tomar acciones óptimas a partir de ese estado.

4.4.2 Otros métodos de optimización de MDP

Una vez planteado un MDP, existen diferentes técnicas capaces de calcular la política óptima que minimiza una determinada función coste. Aunque hay técnicas basadas en las ecuaciones de Bellman como son DP o RL, es

conveniente mencionar otras técnicas de optimización que también pueden resultar útiles. Ejemplos de estas técnicas son la programación lineal (*linear programming* o LP) o los métodos evolutivos. Los métodos evolutivos funcionan de forma similar a como lo hacen los organismos biológicos, cuyas características mejoran de generación en generación, aunque no lo hacen durante su existencia individual. Estos métodos hacen una búsqueda directamente por el espacio de posibles políticas. Dentro de estos métodos encontramos los algoritmos genéticos [Mit98], la programación genética [Koz92], *simulated annealing* [Aze92]. . . Otra forma de resolver problemas de optimización es mediante la programación lineal [Van01]. Este mecanismo calcula la política óptima conociendo las ecuaciones que gobiernan el sistema y resolviendo un programa lineal.

Programación dinámica

Como paso previo al estudio de RL, se va a hacer énfasis en la descripción de la programación dinámica (*dynamic programming*, DP) ya que es una técnica de optimización clásica de la cual RL hereda muchos principios. Dentro de los métodos DP destaca el método de iteración de política (*policy iteration*) [SB98]. No obstante, hay que indicar que no es el único, ya que también se han utilizado los métodos de iteración de valor (*value iteration*) [SB98] o los algoritmos DP distribuidos [Ber82], entre otros.

Método de iteración de política:

El método de iteración de política consiste en la repetición de dos fases:

- Evaluación de la política:

Para la política π , a partir de sus correspondientes tasas de transición del sistema (q_{xy}^π) y los costes asociados a cada estado (γ_x^π), se puede plantear un sistema de ecuaciones cuya solución son los *relative state values* asociados ($v^\pi(x)$) junto con el coste medio de la política (γ^π).

La resolución de este sistema de ecuaciones constituye la fase de evaluación de la política. Cada una de estas ecuaciones es una ecuación de Howard, que, para el caso de MDP de tiempo continuo toman el siguiente valor:

$$\gamma_x^\pi - \gamma^\pi + \sum_{y \neq x} q_{xy}^\pi (v^\pi(y) - v^\pi(x)) = 0. \quad (4.5)$$

- Mejora de la política:

Esta fase consiste en mejorar la política actual (π) a partir de sus *relative state values* ($v^\pi(x)$) y de su coste (γ^π). Para mejorar la política, se deben recorrer todos los estados y todas las posibles acciones para cada estado, tomando la siguiente acción en cada estado

$$\arg \min_a \left\{ \gamma_x^a - \gamma^\pi + \sum_{y \neq x} q_{xy}^a (v^\pi(y) - v^\pi(x)) \right\}. \quad (4.6)$$

La acción a escogida para cada estado constituye la nueva política.

El método de iteración de política se construye fácilmente a partir de la sucesión consecutiva de las dos fases expuestas. De este modo, el proceso consiste en calcular los *relative state values* y coste asociado de una política mediante el proceso de evaluación y posteriormente usar el proceso de mejora de política para calcular una nueva política, repitiéndose de nuevo el proceso. Puesto que la fase de mejora de política siempre consigue una política mejor excepto en el caso de que ya se tenga la política óptima, se puede emplear este criterio como parada del proceso. Denotando como E la fase de la evaluación de la política y como I la fase de mejora, se puede ver el método de iteración de política en la Fig. 4.5. Finalmente hay que indicar que, puesto que el método de iteración de política mejora la política y los MDPs finitos tienen un número finito de políticas, este método converge en un número finito de iteraciones a la política óptima. Aunque finito podría suponer, en teoría, un número enormemente elevado, en la práctica se suele alcanzar la política óptima tras un número pequeño de iteraciones.

$$\pi_0 \xrightarrow{E} v^{\pi_0}, \gamma^{\pi_0} \xrightarrow{I} \pi_1 \xrightarrow{E} v^{\pi_1}, \gamma^{\pi_1} \xrightarrow{I} \dots \xrightarrow{I} \pi^* \xrightarrow{E} v^*, \gamma^*$$

Figura 4.5: Funcionamiento del método de iteración de política.

Aplicación de DP al diseño de políticas CAS:

A continuación se presenta un ejemplo que pretende ilustrar una red fija en la que dos servicios tratan de acceder a unos determinados recursos C . Asimismo, supóngase que el bloqueo de una sesión del servicio i incurre en un coste ω_i , y se desea diseñar una política de admisión óptima π^* que tenga un coste mínimo. Para poder aplicar DP, se hacen la suposiciones de llegadas de Poisson y tiempos de servicio distribuidos exponencialmente. Se considera que las sesiones nuevas del servicio i llegan con tasa λ_i , consumen b_i recursos, $b_i \in \mathbb{N}$ y su tasa de ocupación de los recursos es μ_i . Tal y como se han definido los costes al rechazar sesiones, el coste medio representará una suma ponderada de las tasas de pérdidas de los diferentes servicios. En la siguiente sección se detalla esta estructura de costes, al haberse escogido también al usar RL. Siendo P_i la probabilidad de bloqueo del servicio i , se tendrá:

$$\gamma^\pi = \omega_1 P_1 \lambda_1 + \omega_2 P_2 \lambda_2.$$

El estado del sistema vendrá determinado por $x = (x_1, x_2)$, donde x_i es el número de sesiones del servicio i en curso. Así, y comenzando con la política CS, para calcular la política óptima se calculan los *relative state values* y el coste medio para la política inicial empleando las ecuaciones de Howard (ecuación 4.5). Puesto que hay una incógnita más que el número de ecuaciones, y sólo importa la diferencia entre *relative state values*, se puede hacer $v_{(0,0)} = 0$ para resolver el sistema lineal de ecuaciones. Por ejemplo, aplicado a un problema con parámetros: $C = 5$ unidades de recurso, $b = \{1, 2\}$, $\lambda = \{0.3, 0.15\}$ y $\mu = \{0.2, 0.1\}$, para la política CS los costes medios serán $w_1 \lambda_1 + w_2 \lambda_2$ para los estados $\{(5, 0), (3, 1), (1, 2)\}$, $w_2 \lambda_2$ para los estados $\{(4, 0), (2, 1), (0, 2)\}$ y cero para el resto de casos, puesto que no habrán rechazos en esos casos. Posteriormente a la fase de evaluación de política se

realiza la fase de mejora, tal y como se define en la ecuación 4.6. Tras unas pocas repeticiones de estas fases se obtiene la política óptima.

En la Fig. 4.6 se muestran tres escenarios (filas) que difieren en los costes asociados al rechazo de sesiones. La región punteada muestra la región de aceptación de ambos servicios (en columnas diferentes) cuando se emplea la política CS, mientras que la zona sombreada muestra la región de aceptación de la política óptima calculada. En los dos primeros escenarios las peticiones del servicio 2 se aceptan siempre mientras que las peticiones del servicio 1 se aceptan únicamente en unos pocos casos. En el tercer escenario, el rechazo de una sesión del servicio 1 es más costosa que el rechazo de una sesión del servicio 2, por lo que no es sorprendente que en este escenario la política óptima rechace siempre las peticiones del servicio 2, dado que ocupan más recursos que las del servicio 1 y no son tan valiosas. Por ese motivo, los estados (x_1, x_2) , $x_2 > 0$ no son alcanzables. Por otra parte, se observa que las peticiones del servicio 1 se aceptan siempre mientras hayan recursos disponibles.

4.4.3 Aprendizaje reforzado y su aplicación al diseño de políticas CAS

El aprendizaje reforzado (*reinforcement learning*, RL) [SB98] es el problema con el que se enfrenta un agente que debe aprender una política de control óptima a través de interacciones de prueba y error con un entorno dinámico. Por este motivo, es común decir que son técnicas de aprendizaje por interacción, de manera que se asignan costes a las acciones que se van realizando. La forma de aprender políticas óptimas está íntimamente ligada con la implementación que se hace en RL de las ecuaciones de Bellman. Así, el algoritmo RL se basa en la obtención de sucesivas aproximaciones de $v^*(x)$ en las ecuaciones de Bellman sustituyendo los diferentes parámetros que aparecen en las mismas mediante muestras o realizaciones obtenidas, normalmente, mediante simulación.

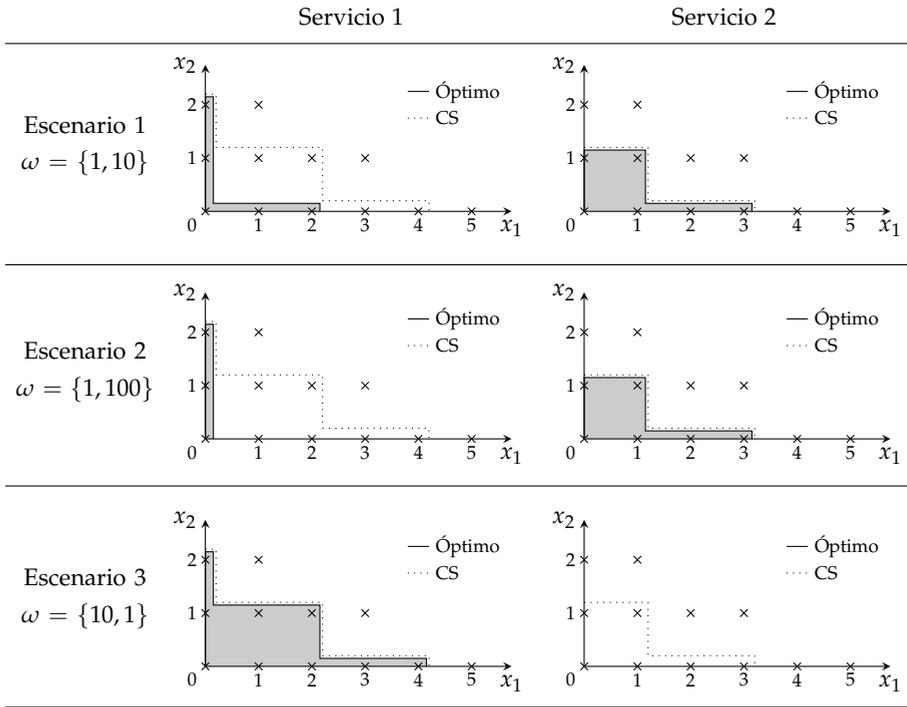


Figura 4.6: Políticas óptimas calculadas con DP.

Aunque las técnicas DP han sido ampliamente utilizadas en la literatura, presentan problemas como los denominados *curse of dimensionality* y *curse of modeling*. El primero de ellos se refiere al problema existente cuando el número de estados o de acciones es muy elevado, ya que eso comporta la resolución de sistemas de ecuaciones muy grande. El segundo se refiere a la dificultad de conocer con exactitud todos los parámetros del modelo en sistemas complejos. Las técnicas RL tratan de resolver estas cuestiones, aunque por contra y a diferencia de DP únicamente son capaces de conseguir soluciones subóptimas. La eficiencia de los algoritmos RL respecto a DP se consigue combinando las siguientes dos características. Por un lado, evitan

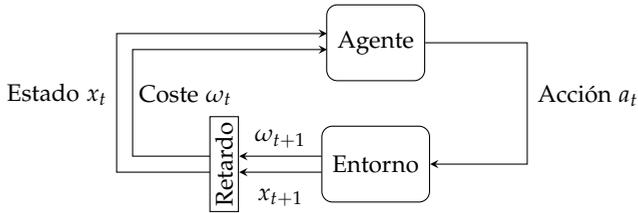


Figura 4.7: Diagrama de bloques que conforman un problema RL.

las exhaustivas iteraciones de DP restringiendo el cálculo a diferentes realizaciones del sistema, y por otra parte, en cada estado, en lugar de evaluar todos sus posibles sucesores, se concentra en los que parecen más prometedores.

En la Fig. 4.7 podemos ver los bloques que conforman un problema de optimización a resolver mediante RL. Este sistema se conforma de varios elementos siendo el agente el lugar donde se implementa el algoritmo RL. Este agente debe decidir qué acción tomar en cada instante de decisión, recibiendo como entradas el estado actual del sistema y el coste obtenido tras la última acción realizada. Su única salida será la siguiente acción a realizar. Se considera como entorno todo lo que aparece en el sistema externo al agente. La misión del entorno es reaccionar a la acción tomada por el agente mediante un nuevo estado y un nuevo coste. El entorno puede ser un sistema real o simulado. En este trabajo el entorno es un sistema simulado mediante eventos discretos. Debido a la naturaleza heurística del proceso de simulación junto con el de aprendizaje, en todos los casos evaluados en este trabajo se han realizado 10 simulaciones inicializadas con semillas diferentes. El funcionamiento, tomando una base de tiempos discreta, es el siguiente. Cada iteración t , el agente observa el estado x_t y recibe el coste ω_t . Siguiendo el algoritmo RL el agente realiza la acción a_t . Debido a esa acción, el entorno reacciona cambiando el estado a x_{t+1} y generando un nuevo coste ω_{t+1} , valores que se considerarán en la siguiente iteración.

En la Fig. 4.8 se observa de forma más específica el funcionamiento del agente, pudiendo ser $U(x, a)$ tanto $v(x)$ como $Q(x, a)$. En ella se observa que

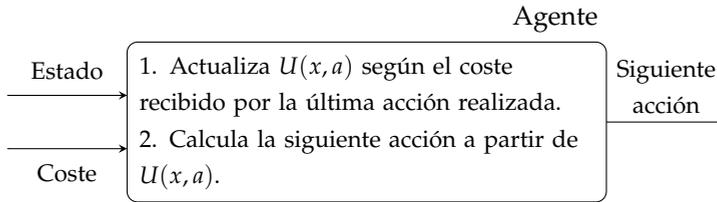


Figura 4.8: Acciones del agente respecto a los *state(-action) values*.

los valores almacenados en $U(x, a)$ son los que se encarga de actualizar el algoritmo para aprender y de leer para conocer cuál es la acción óptima en cada estado.

Un factor clave a la hora de resolver problemas mediante RL es el compromiso denominado exploración vs. explotación (en su terminología anglosajona *exploration vs. exploitation*). Durante el funcionamiento normal del agente, se escogen las acciones que se estima que minimizan los costes a largo plazo. Este funcionamiento es a lo que se le denomina explotación, puesto que el objetivo es tratar de explotar al máximo el conocimiento disponible de los *relative state values* de cada estado. Sin embargo, es también necesario realizar una exploración del espacio de estados tomando acciones no óptimas que nos conduzca a conocer mejor el espacio de estados. De este modo, se pueden llegar a conocer alternativas que a largo plazo sean mejores a las que hasta ese momento se consideraban como óptimas. Por ese motivo, hay que hacer un balance entre ambas técnicas, siendo muy común el comenzar con un porcentaje alto de exploración inicial (hasta que se considere que se tiene un conocimiento suficiente del espacio de estados) para posteriormente explotar esa información tomando casi siempre acciones óptimas.

Se han propuesto o empleado hasta la fecha numerosas estrategias de exploración [Bro99, DCM92, Sut90, SBP04, TO98]. Aunque cualquier técnica de exploración es válida, existen unos métodos típicos. En el presente trabajo se ha empleado la técnica de exploración propuesta en [DCM92]. Este tipo de exploración define un mecanismo para disminuir de forma gradual la proba-

bilidad de exploración. Siendo m la iteración en la que nos encontremos, la probabilidad de exploración (p_m) será igual a:

$$p_m = \frac{p_0}{1 + u_m}, \quad u_m = \frac{m^2}{\phi + m}.$$

Hay que destacar que, excepto en los casos en los que se evalúa el efecto de la exploración en RL, se ha comprobado que los valores de exploración escogidos son suficientes para conocer el espacio de estados. Aunque ralentice la convergencia, se ha preferido tomar valores conservadores (altos) para la exploración para conseguir las mejores políticas. Evidentemente, eso se hace en contraposición a conseguir tiempos de aprendizaje pequeños, pero el objetivo de este trabajo no es el funcionamiento *online*. Si esa fuera la finalidad debería considerarse adicionalmente el usar métodos de aproximación de funciones en lugar de almacenar todos los *relative state(-action) values* en memoria, solución que se llama *lookup tables*. Como ejemplos de técnicas que evitan el uso de *lookup tables* se tienen la regresión lineal local (*Local Linear Regression* – LLR) [TO98] o las redes neuronales artificiales (*Artificial Neural Networks* – ANN) [SBP04]. Sin embargo, no se emplean en este trabajo este tipo de técnicas porque conducen a soluciones subóptimas y en este trabajo se pretenden establecer los límites teóricos que aporta la información de predicción de movimiento.

Aplicación básica de RL al diseño de políticas CAS en redes celulares

En la Fig. 4.9 se puede observar cuál será el funcionamiento general del sistema. Con el simulador celular en funcionamiento, cada cierto tiempo llegará una nueva sesión o *handover* a la célula en estudio. Es en esos momentos cuando hay que tomar una decisión de entre dos posibles: aceptar o rechazar la petición. Por ese motivo, esos instantes se denominan instantes de decisión (*decision epochs*). Nótese que de entre todos los flujos se escoge uno como el más prioritario, aceptándose sus peticiones mientras existan recursos disponibles, por lo que sus llegadas no constituyen un instante de decisión. La

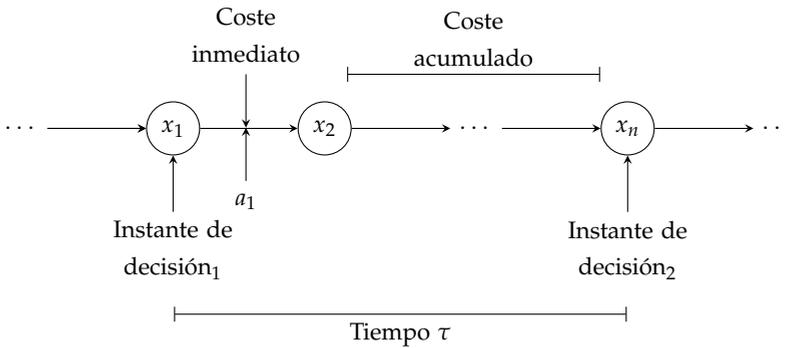


Figura 4.9: Estados, acciones, costes e instantes de decisión.

decisión se hará en función del estado del sistema (x_1). Esa interrogación la hará el simulador al módulo de aprendizaje reforzado, contestando este último con la acción que se debe de tomar (a_1). Tras tomar esa acción, el simulador cambia su estado (x_2) y recibe un coste inmediato. Hasta el siguiente instante de decisión transcurrirá un tiempo τ y se recibirá un coste acumulado por el rechazo de peticiones del flujo más prioritario.

Para un sistema de este tipo se puede comprobar que para cada política estacionaria determinista la cadena de Markov implícita tiene una matriz de probabilidades de transición *unichain*² y por lo tanto, el coste medio por unidad de tiempo no varía con el estado inicial [Put94]. El objetivo será encontrar la política π que minimice el coste medio por unidad de tiempo esperado (γ^π), la cual se denomina política óptima.

Definición del espacio de estados (S) y de acciones (A)

Se ha considerado que el agente RL encargado de la optimización conoce en todo momento el estado del sistema. No se va a detallar más en esta sección la estructura del espacio de estados cuando se considera información

²Nótese que en el caso que nos ocupa esta condición siempre se cumple puesto que para cualquier política se puede alcanzar el estado correspondiente al sistema vacío.

de predicción de movimiento, puesto que dependerá, en gran medida, del tipo de información que se considere así como de otros factores como el uso de post-estados o la forma de agregar la información.

El espacio de acciones del sistema es muy simple, ya que, cuando existen recursos disponibles para la sesión, únicamente se dispone de dos acciones posibles: aceptar y rechazar.

$$\mathcal{A} := \{a = \{0, 1\} : a = 0 \text{ rechazar}; a = 1 \text{ aceptar}\}.$$

En el caso de que no existan suficientes recursos para la petición de la sesión, únicamente se puede tomar la acción de rechazar.

Estructura de los costes

Durante el funcionamiento del simulador, se penalizarán los bloqueos de sesiones nuevas o de *handovers* mediante un factor, que dependerá del flujo al que pertenezca la sesión rechazada. Así, un factor mayor implicará una penalización superior. Es decir, cada vez que se descarta una sesión, se añade al coste esa penalización. Para el servicio i la penalización por el descarte de una sesión nueva (de *handover*) será ω_i^n (ω_i^h). Para esta estructura de costes se minimiza la suma ponderada de las tasas de pérdidas de los diferentes flujos

$$\gamma^\pi = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^N N_i^n(T) \omega_i^n + \sum_{i=1}^N N_i^h(T) \omega_i^h}{T} = \sum_{i=1}^N [\lambda_i^n P_i^n \omega_i^n + \lambda_i^h P_i^h \omega_i^h],$$

donde $N_i^n(T)$ representa el número de sesiones nuevas descartadas del servicio i hasta el instante T , $N_i^h(T)$ el número de *handovers* descartados del servicio i hasta el instante T y P_i^n y P_i^h representan las probabilidades de pérdidas de sesiones nuevas y de *handovers* del servicio i respectivamente.

Algoritmo SMART

En el presente trabajo se ha empleado el algoritmo RL denominado SMART, definido en [DGMM99]. Este algoritmo recibe su nombre de *Semi-Markov*

Average Reward Technique. Como su propio nombre indica, es un algoritmo RL que optimiza el coste medio en MDP cuyos instantes de decisión no están equiespaciados en el tiempo. SMART estima $Q(x, a)$ mediante simulación, usando un método de diferencia temporal $TD(0)$ [SB98]. Si en el instante de decisión $(m - 1)$ el sistema está en el estado x , se toma la acción a y el sistema se encuentra en el estado y en el instante de decisión m , entonces se actualiza el valor relativo de la pareja estado-acción del siguiente modo:

$$Q_m(x, a) = Q_{m-1}(x, a) + \alpha_m \left\{ \omega_m(x, a, y) - \gamma_m \tau_m(x, a, y) + \min_{a' \in A_y} Q_{m-1}(y, a') - Q_{m-1}(x, a) \right\},$$

donde $\omega_m(x, a, y)$ y $\tau_m(x, a, y)$ son respectivamente el coste total y el tiempo transcurrido entre los instantes de decisión $(m - 1)$ y m , α_m es la tasa de aprendizaje en el instante de decisión m y γ_m es el coste medio por unidad de tiempo estimado de la siguiente manera

$$\gamma_m = \frac{\sum_{k=1}^m \omega_k(x^{(k)}, a^{(k)}, y^{(k)})}{\sum_{k=1}^m \tau_k(x^{(k)}, a^{(k)}, y^{(k)})}.$$

El algoritmo funciona del siguiente modo:

SMART

- 1: Inicializar $Q(x, a) \forall x \in \mathcal{S}, \forall a \in \mathcal{A}$ aleatoriamente (normalmente a ceros)
- 2: Inicializar γ aleatoriamente (normalmente $\gamma = 0$)
- 3: Inicializar $W_T = 0$ y $T_T = 0$
- 4: Repetir siempre:
 - 5: Tomar una acción a :
 - 6: Exploración: acción aleatoria
 - 7: Greedy: la acción que maximiza $Q(x, a)$
Siendo x el estado actual, a la acción tomada, y el estado resultante, ω el coste obtenido entre x e y y siendo τ el tiempo desde x a y
 - 8: $Q(x, a) \leftarrow Q(x, a) + \alpha[\omega - \gamma\tau + \min_{a'} Q(y, a') - Q(x, a)]$
 - 9: Si a no es de exploración:

10: $W_T \leftarrow W_T + \omega$
 11: $T_T \leftarrow T_T + \tau$
 12: $\gamma \leftarrow W_T/T_T$
 13: $x \leftarrow y$

En todos los casos en los que se emplea este algoritmo se ha tomado $\alpha_m = \alpha = 0.01$.

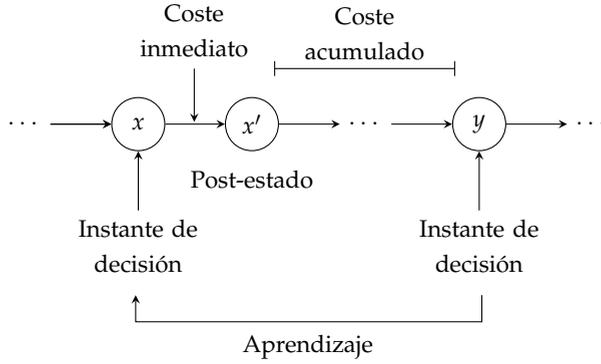
Post-estados

La idea de los post-estados (*afterstates*) se introduce brevemente en la Sección 6.8 de [SB98]. Es una idea que no puede ser aplicada a todos los problemas RL, sino que puede ser útil para algunos casos en concreto, como el caso de la optimización CAS que nos ocupa. La comparativa del aprendizaje de RL convencional y de RL con post-estados se puede observar en la Fig. 4.10 donde se observa sobre qué estado se aprende en cada instante de decisión y la estructura de costes acumulados e inmediatos considerada.

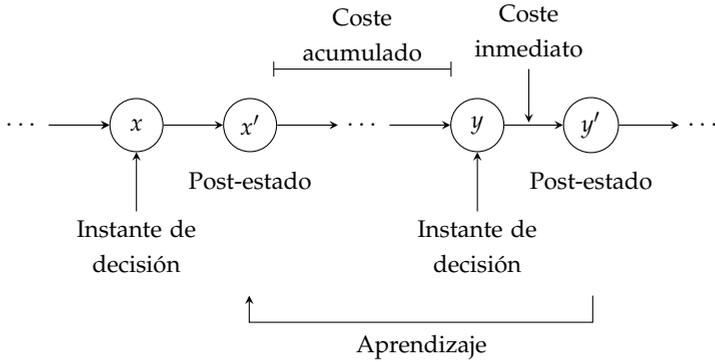
En el caso general de CAS en redes celulares multiservicio y al emplear RL convencional, se tiene que incorporar en el espacio de estados el tipo de petición que trata de acceder al sistema. Sin embargo, al emplear post-estados se puede eliminar del espacio de estados la dimensión que determina el tipo de sesión entrante ya que lo importante es conocer el estado inmediatamente posterior alcanzado tras tomar una decisión. De este modo, al emplear post-estados se reducirá la cardinalidad del espacio de estados, especialmente cuando el número de servicios sea alto. Además, el algoritmo SMART modificado emplea *relative state values* en lugar de *state-action values*, por lo que ya no hay que almacenar para cada estado el coste relativo de las dos posibles acciones a realizar.

Hay que indicar que, a lo largo del presente trabajo, en los casos en los que se han empleado post-estados la tasa de aprendizaje (α) se ha modificado con el tiempo de la manera:

$$\alpha(x) = \frac{1}{1 + N(x)},$$



(a) RL convencional.



(b) RL con post-estados.

Figura 4.10: Funcionamiento de RL convencional y con post-estados.

donde $N(x)$ es el número de visitas realizadas al estado x hasta el momento.

Tras introducir el concepto de los post-estados, el algoritmo SMART modificado desarrollado es el siguiente:

SMART con post-estados

- 1: Inicializar $v(x), \forall x \in \mathcal{S}$, aleatoriamente (normalmente a ceros)
 - 2: Inicializar γ aleatoriamente (normalmente $\gamma = 0$)
 - 3: Inicializar $N(x) = 0, W_T = 0$ y $T_T = 0$
 - 4: Repetir siempre:

Se denota por a a la acción escogida en el estado actual y , por $y'_{rechazar}$ ($y'_{aceptar}$) al post-estado cuando se toma la acción de rechazar (aceptar) y por $\omega_{rechazar}$ al coste inmediato cuando se rechaza la petición.
 - 5: Tomar una acción a :
 - 6: Exploración: acción aleatoria
 - 7: Greedy: la acción seleccionada de

si $(\omega_{rechazar} + v(y'_{rechazar})) < v(y'_{aceptar})$ entonces
 $a = rechazar$
 en caso contrario
 $a = aceptar$
 - 8: $\alpha = 1/(1 + N(x'))$
 siendo α la tasa de aprendizaje, x' el post-estado previo y $N(x')$ el número de veces que el post-estado x' se ha actualizado:
 - 9: $v(x') \leftarrow (1 - \alpha)v(x') +$
 $\quad + \alpha[w_c(x', y) + w(y, a) + v(y') - \gamma\tau]$
 $N(x') \leftarrow N(x') + 1$
 siendo $w_c(x', y)$ el coste acumulado cuando el sistema evoluciona desde x' a y , $w(y, a)$ el coste inmediato de tomar la acción a en el estado y y τ el tiempo que ha transcurrido entre los instantes de decisión m y $m + 1$ (véase Fig. 4.10(b)).
 - 10: Si a es greedy:
 - 11: $W_T \leftarrow W_T + w_c(x', y) + w(y, a)$
 - 12: $T_T \leftarrow T_T + \tau$
 - 13: $\gamma \leftarrow W_T/T_T$
 - 14: $x' \leftarrow y'$
-

4.5 Evaluación de las políticas obtenidas mediante la técnica de los post-estados

En esta sección se va a realizar una primera evaluación de las ventajas de RL con post-estados respecto al empleo de RL convencional. El escenario escogido para llevar a cabo esta comparación es una red celular con dos servicios ($N = 2$) con $C = 10$ y $C_p = 60$ unidades de recurso. Asimismo, se ha escogido $N_i^h = 1$, $\mu = \{1, 3\}$, $b = \{1, 2\}$, $f_i = \{0.8, 0.2\}$ y $\lambda_T = 2$. Los costes asociados al bloqueo de peticiones nuevas y de *handovers* son $\omega_1^n = 1$, $\omega_2^n = 4$, $\omega_1^h = 20$ y $\omega_2^h = 80$. Para el algoritmo RL, se ha empleado una exploración con unos valores de $p_0 = 0.2$ y $\phi = 10^{12}$.

La comparación se ha llevado a cabo con tres tipos de información: sin predicción, con predicción de entrada y con predicción de entrada y salida conjuntamente. En escenarios multiservicio, se plantean diferentes representaciones del estado en función de, por ejemplo, si se considera la ocupación desglosada por servicio o agregada para todos los servicios. Aunque con posterioridad se analiza este asunto, en esta sección se va a tomar de la forma más simple posible, es decir, agregando la información de los diferentes servicios tanto de la ocupación de la célula como de la información predictiva. De este modo, si se denota por x_0 al número de unidades de recurso ocupadas en la célula en estudio y por x_{in} (x_{out}) al número de unidades de recurso ocupadas por las sesiones etiquetadas como H por el AP de entrada (salida), entonces el espacio de estados cuando se emplean post-estados para un escenario sin predicción y con predicción estocástica de entrada y de entrada y salida conjuntamente es, respectivamente:

$$\mathcal{S} := \{\mathbf{x} = (x_0) : 0 \leq x_0 \leq C\},$$

$$\mathcal{S} := \{\mathbf{x} = (x_0, x_{in}) : x_0 \leq C; x_{in} \leq C_p\},$$

$$\mathcal{S} := \{\mathbf{x} = (x_0, x_{in}, x_{out}) : x_{out} \leq x_0 \leq C; x_{in} \leq C_p\}.$$

En redes celulares multiservicio, la introducción de post-estados nos permite reducir la cardinalidad del espacio de estados en comparación con la

definición de RL convencional, ya que cuando no se emplean post-estados, los espacios de estados vienen definidos por:

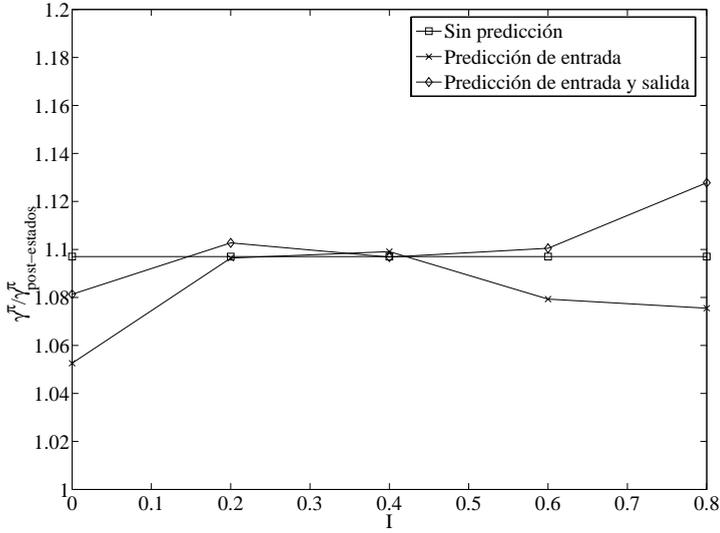
$$\mathcal{S} := \{\mathbf{x} = (x_0, k) : 0 \leq x_0 \leq C; 1 \leq k \leq (2N - 1)\},$$

$$\mathcal{S} := \{\mathbf{x} = (x_0, x_{in}, k) : x_0 \leq C; x_{in} \leq C_p; 1 \leq k \leq (2N - 1)\},$$

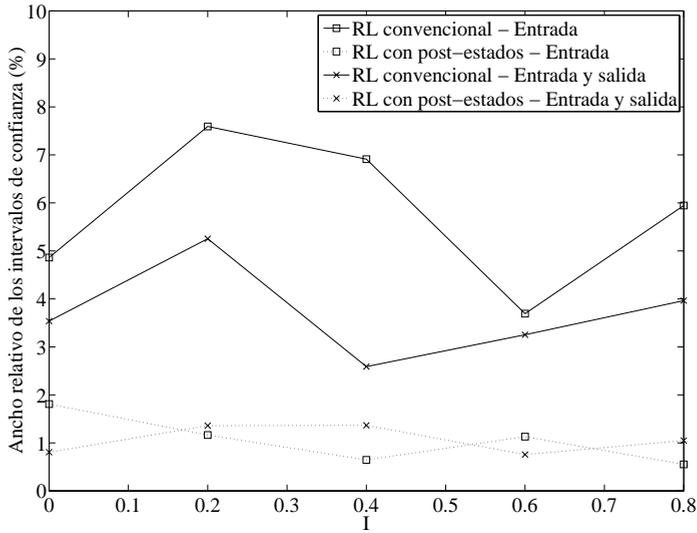
$$\mathcal{S} := \{\mathbf{x} = (x_0, x_{in}, x_{out}, k) : x_{out} \leq x_0 \leq C; x_{in} \leq C_p; 1 \leq k \leq (2N - 1)\}.$$

Como se puede observar, en todos los casos existe una coordenada adicional (k) en la representación del espacio de estados relacionada con el tipo de llegada sobre la que hay que decidir y que puede tomar $2N - 1$ valores diferentes (recuérdese que de los $2N$ tipos de llegada hay uno que se considera como el más prioritario, por lo que sus peticiones se admiten mientras existan recursos disponibles). En RL con post-estados, puesto que el aprendizaje se realiza sobre el estado que se alcanza inmediatamente después de que se tome una acción, no es necesario incluir el tipo de llegada en el aprendizaje. Esta conclusión toma mayor importancia para sistemas donde el número de servicios es elevado, ya que en esos casos se consiguen grandes reducciones del espacio de estados.

Según los resultados, el uso de post-estados nos ofrece dos ventajas fundamentales. En primer lugar, para diferentes valores de la incertidumbre (I), la Fig. 4.11(a) muestra que, para el escenario en estudio, la ganancia que puede obtenerse para la función a minimizar es de alrededor de un 10%, cuantificada como el cociente del coste de las políticas óptimas calculadas por ambos métodos. La segunda ventaja es que el ancho relativo de los intervalos de confianza al 95% es inferior cuando se emplean post-estados, como se aprecia en la Fig. 4.11(b). En resumen, con el empleo de post-estados se pueden obtener mejores soluciones (γ^{π} inferiores) y más precisas (los anchos relativos de los intervalos de confianza son inferiores). Por ese motivo, a partir de ahora, y mientras no se indique lo contrario se empleará RL con post-estados. Sin embargo, posteriormente se llevará a cabo (en la sección 4.7.2) otra comparativa en escenarios multiservicio de mayor complejidad. Se lleva a cabo más adelante para poder justificar antes determinadas decisiones referentes



(a) Impacto en γ^{π} .



(b) Impacto en los intervalos de confianza.

Figura 4.11: Evaluación del uso de post-estados.

a la información predictiva así como a la elección de la representación del estado del sistema que en esa sección se emplea.

4.6 Redes celulares monoservicio

En esta sección se muestran los resultados numéricos referentes a la optimización de políticas CAS en redes celulares monoservicio. En primer lugar, se hace una comparativa con los resultados obtenidos cuando se emplea DP como técnica de optimización al emplear predicción estocástica de entrada de *handovers*. Posteriormente, se evalúan las ganancias que pueden alcanzarse al considerar predicción estocástica y determinista. Finalmente, se compara con los resultados de la propuesta definida en [CS02]. En la notación de toda la sección y por simplificar al tratarse de una red monoservicio, se omiten los subíndices relativos al número de servicio.

4.6.1 Comparación con programación dinámica

En determinadas condiciones, es posible aplicar DP para optimizar políticas CAS en redes celulares monoservicio con predicción de movimiento. Por ese motivo, se desarrolla un escenario de ese tipo para aplicar tanto DP como RL y, así, poder comparar los resultados.

Cuando se dispone únicamente de información predictiva relacionada con el número de *handovers* entrantes y se dispone de un único servicio, se pueden calcular mediante DP las políticas óptimas alcanzadas al emplear esta información, tal y como se describe en [Pla05, PGGMBCG04] o también mediante RL, tal y como se describe en el presente trabajo. Para este escenario el espacio de estados está definido por:

$$\mathcal{S} := \{x = (x_0, x_{in}) : 0 \leq x_0 \leq C; 0 \leq x_{in} \leq C_p\},$$

donde x_0 es el número de recursos ocupados en la célula en estudio y x_{in} es el número de recursos etiquetados como H en las inmediaciones, es decir, el

número de recursos que van a ser necesarios en la célula en estudio. En todos los casos se emplea un valor de C_p elevado para que no tenga impacto en los resultados. En los estados (x_0, x_{in}) , $x_0 < C$, el conjunto de posibles acciones está definido por $\mathcal{A} := \{0, 1\}$, siendo $a = 0$ la acción de rechazar una nueva sesión y $a = 1$ la de aceptarla. Cuando $x_0 = C$ la única acción posible es el rechazo. Los *handovers* se aceptan mientras hayan recursos disponibles en el sistema.

Para resolver este sistema mediante DP y, resumiendo la información de [Pla05, PGGMBCCG04], se puede modelar mediante un CTMC cuyas transiciones se muestran en la Fig. 4.12, donde $\lambda'_h = q\lambda(1 - \hat{S}_H)\mu^p / (\mu^p + \mu^s)$, es decir, la tasa de llegada de *handovers* que no han sido predichos. Nótese que cuando una sesión sale de la célula en estudio, no se le permite volver a entrar, por lo que esas sesiones no se clasifican por el AP de entrada. La estructura de costes cuando se selecciona la acción a en el estado x toma el valor $(1 - a)\omega^n \lambda^{nc}$ cuando $x_0 < C$ y $\omega^n \lambda^{nc} + \omega^h (\lambda'_h + x_{in} p \mu^p)$ cuando $x_0 = C$. A partir de estas definiciones, ya es posible aplicar el método de iteración de política.

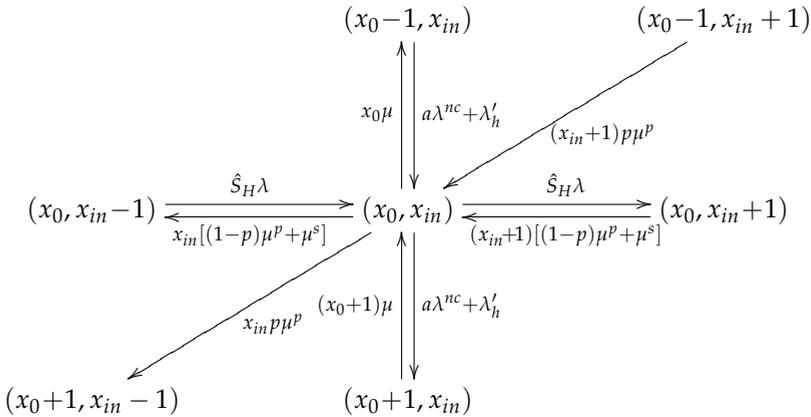


Figura 4.12: Diagrama de transiciones para el método DP.

Este mismo problema se puede resolver mediante RL, más concretamente con el uso de SMART con post-estados. Para hacer ambos modelos comparables, se ha introducido en RL la misma tasa de entrada al AP de entrada que se tiene en DP. Asimismo, no se permite que una sesión que sale de la célula en estudio pueda volver a entrar. Aunque por el carácter de simulación de RL este hecho se puede cambiar fácilmente, se ha dejado de este modo a lo largo del presente trabajo, ya que es intuitivamente razonable que un usuario que salga de la célula en estudio siga su trayectoria y abandone las inmediaciones hacia fuera del sistema. En DP la tasa de entrada al AP de entrada es:

$$\lambda_{DP} = (1 - P^n)(1 - P^{tf})\lambda_n \left(N^h + \frac{\mu^r}{\mu^p} \right) \left(\frac{1}{S_H} \right).$$

Como no se permite que las sesiones que salen de la célula vuelvan a entrar, las sesiones que se clasificarán serán $\lambda_{RL} = \lambda^{ng} + \lambda^{ho}$, habiéndose hecho $\lambda_{RL} = \lambda_{DP}$. Para conseguir esa igualdad y mantener la proporcionalidad entre áreas y perímetros que definen las tasas λ^{ng} y λ^{ho} respectivamente, se ha calculado el radio equivalente de las inmediaciones necesario para que $\lambda_{RL} = \lambda_{DP}$. Por lo tanto, siendo ρ el radio exterior de las inmediaciones, se cumple

$$\lambda_{RL} = \lambda^{ng} + \lambda^{ho} = (\rho^2 - 1)\lambda^{nc} + \rho\lambda^{hc} = \lambda_{DP}.$$

El escenario estudiado tiene las siguientes características: $C = 10$, $C_p = 60$, $\mu^r / \mu^s = 1$, $\mu = 1$, $\lambda^{nc} = 2$, $\omega^n = 1$, y $\omega^h = 20$. Para el algoritmo RL se ha tomado $\phi = 10^{12}$ y $p_0 = 0.3$. Los resultados se muestran en la Fig. 4.13 donde se observa que las prestaciones conseguidas con RL son similares a las calculadas con DP. En la figura se muestra la ganancia que se obtiene al emplear información predictiva de los *handovers* entrantes para diferentes valores de la incertidumbre I del AP. La ganancia se cuantifica como el cociente entre el coste de la política óptima calculada cuando no se emplea predicción (γ_{wp}^π) y cuando se emplea predicción de entrada (γ_p^π). Además, para la curva relativa a RL se muestran los intervalos de confianza al 95 %.

El mayor inconveniente de las técnicas RL es que las soluciones obtenidas son quasi-óptimas, en lugar de óptimas, como ocurre en DP. Sin embargo,

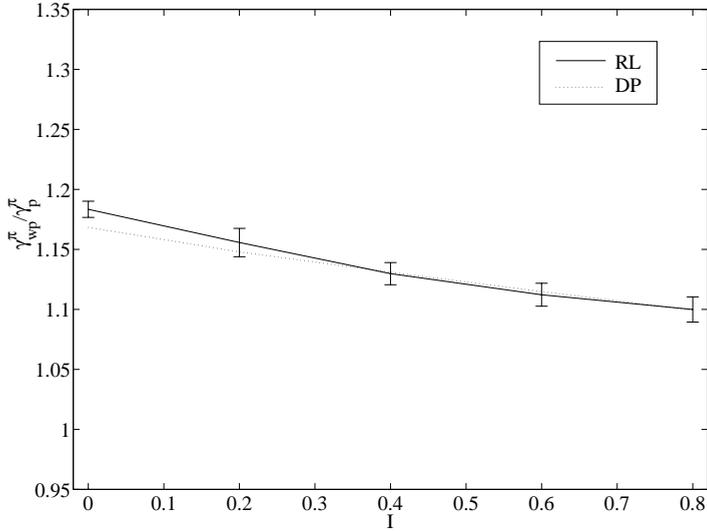


Figura 4.13: Comparación entre DP y RL en escenario monoservicio.

en la Fig. 4.13 se muestra como, en el escenario estudiado, las políticas que consiguen ambas metodologías son muy similares. Sin embargo, la optimización mediante DP presenta inconvenientes insalvables cuando se trata de optimizar sistemas más complejos, los llamados *curse of dimensionality* y *curse of modeling* por la explosión del espacio de estados y por la dificultad de definir todas las probabilidades de transición que describe el sistema, respectivamente. Por ese motivo, para analizar los sistemas celulares y de predicción más complejos que se tratan en las siguientes secciones se emplea RL, sirviendo esta sección para concluir que las prestaciones obtenidas mediante RL se espera que sean similares a las óptimas.

4.6.2 Predicción estocástica y determinista

En esta sección se van a analizar las ganancias alcanzadas cuando se emplea predicción estocástica y determinista en un escenario con las siguientes características: $C = 10$, $C_p = 60$, $\mu^r / \mu^s = 1$, $\mu = 1$, $\lambda^{nc} = 2$, $\omega^n = 1$, y $\omega^h = 20$. Para el algoritmo RL se ha tomado $p_0 = 0.2$ y $\phi = 10^{11}$ cuando se emplea predicción de entrada o salida y $\phi = 10^{12}$ cuando se emplea predicción de entrada y salida simultáneamente, sea estocástica o determinista.

El espacio de estados para este sistema cuando no se emplea predicción, cuando se emplea sólo predicción de entrada, sólo de salida y de salida y entrada simultáneamente es, respectivamente:

$$\mathcal{S} := \{\mathbf{x} = (x_0) : x_0 \leq C\},$$

$$\mathcal{S} := \{\mathbf{x} = (x_0, x_{in}) : x_0 \leq C; x_{in} \leq C_p\},$$

$$\mathcal{S} := \{\mathbf{x} = (x_0, x_{out}) : x_{out} \leq x_0 \leq C\},$$

$$\mathcal{S} := \{\mathbf{x} = (x_0, x_{in}, x_{out}) : x_{out} \leq x_0 \leq C; x_{in} \leq C_p\}.$$

Nótese que el espacio de estados es el mismo independientemente de si se emplea predicción estocástica o determinista.

Predicción estocástica

En esta sección se analizan las prestaciones de la política CAS óptima que considera predicción estocástica de *handovers* para diferentes valores de la incertidumbre I . Los resultados se muestran en la Fig. 4.14, observándose que el empleo de predicción de *handovers* entrantes conduce a las mayores ganancias, y, como cabía esperar, las ganancias disminuyen conforme se toman mayores valores para la incertidumbre del AP. En la Fig. 4.14 también se observa que el conocimiento del número *handovers* salientes no es relevante para el diseño de políticas CAS, siendo incluso independiente del grado de incertidumbre. Este comportamiento puede explicarse del siguiente modo.

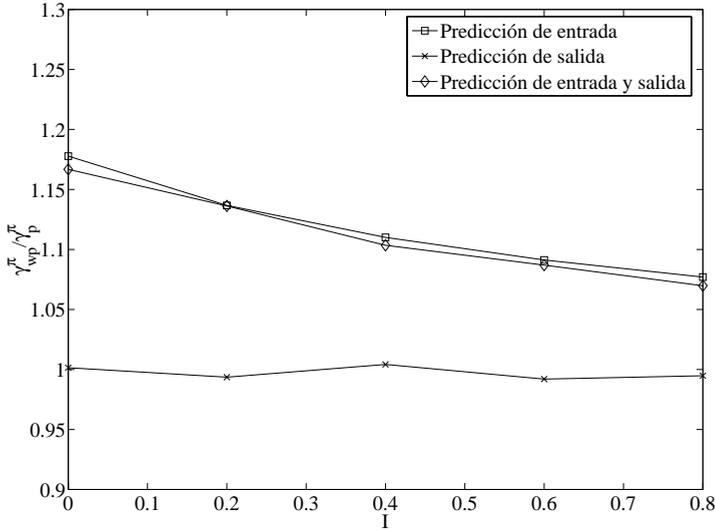


Figura 4.14: Predicción estocástica en escenario monoservicio.

Lema 1. Sean X e Y dos variables aleatorias independientes distribuidas exponencialmente con medias $1/\mu_x$ y $1/\mu_y$, y sea $f_{(X,Y)}(x,y)$ su función densidad de probabilidad conjunta, donde $f_{(X,Y)}(x,y) = f_X(x)f_Y(y)$. Entonces la función densidad de probabilidad de X condicionada a $X < Y$, viene dada por

$$\begin{aligned}
 f_X(x|X < Y) &= \frac{\int_x^\infty f_{(X,Y)}(x,y)dy}{\int_0^\infty \int_x^\infty f_{(X,Y)}(x,y)dydx} = \frac{f_X(x) \int_x^\infty f_Y(y)dy}{\int_0^\infty \int_x^\infty f_X(x)f_Y(y)dydx} \\
 &= (\mu_x + \mu_y)e^{-(\mu_x + \mu_y)x}.
 \end{aligned}$$

Ahora considérese un predictor de *handovers* salientes perfecto, es decir, con $p = 1$ y $q = 0$. Las sesiones etiquetadas como H liberarán los recursos porque abandonan la célula (ya que se sabe que esto ocurrirá antes de que la sesión finalice) y, de aquí, aplicando el resultado del Lema 1, el tiempo

de ocupación de los recursos está distribuido exponencialmente con media $1/(\mu^r + \mu^s)$. En cambio, las sesiones etiquetadas como NH liberarán los recursos debido a que sus sesiones finalizan (debido a que se sabe que esto ocurrirá antes de que el terminal abandone la célula) y de aquí que el tiempo de ocupación de los recursos estará distribuido exponencialmente con media $1/(\mu^r + \mu^s)$. Nótese que, puesto que el tiempo de ocupación de los recursos tanto para las sesiones etiquetadas como H o como NH está distribuido del mismo modo, tener un AP de *handovers* salientes no aporta nada. Por otra parte, si no se considera predicción saliente, una sesión activa liberará los recursos porque la sesión finaliza o el terminal abandona la célula, dependiendo de qué es lo que ocurra en primer lugar. Por lo tanto, el tiempo de ocupación de los recursos estará también distribuido exponencialmente con media $1/(\mu^r + \mu^s)$.

En resumen, si tanto el tiempo de residencia como de ocupación de los recursos están distribuidos exponencialmente, saber si una sesión producirá un *handover* no aporta, en teoría, ningún tipo de información útil al proceso de diseño de políticas CAS. Además, las prestaciones tampoco se ven afectadas por la precisión del AP.

Finalmente, hay que destacar que el principal reto del diseño de técnicas de reserva de recursos eficientes en redes celulares es el balance entre dos requisitos conflictivos: reservar bastantes recursos para conseguir una baja probabilidad de terminación forzosa mientras se mantiene una alta utilización de los recursos al no bloquear demasiadas nuevas peticiones. La Fig. 4.15, que muestra el cociente entre la utilización de los recursos cuando no se emplea predicción y cuando sí se hace ($\text{utilización}_{wp}/\text{utilización}_p$) demuestra que no se producen pérdidas en la utilización al emplear información predictiva y calcular la política CAS óptima.

Predicción determinista

En esta sección se evalúa el impacto de poseer un conocimiento más preciso del instante futuro en el que los *handovers* van a tener lugar. Más concreta-

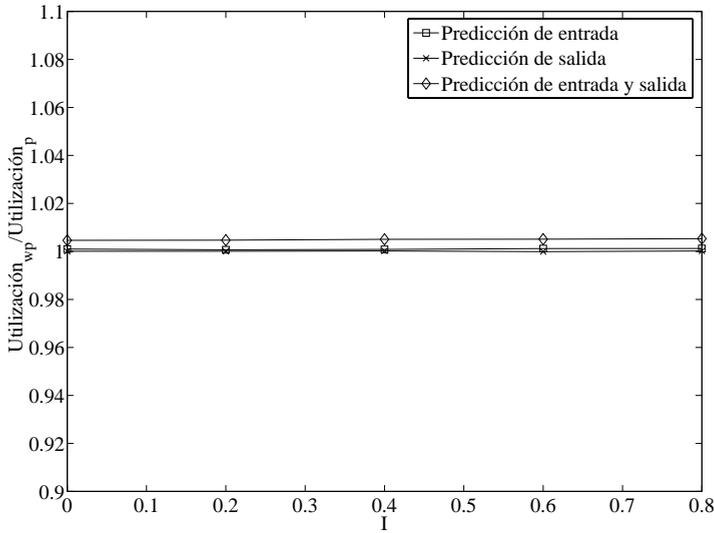


Figura 4.15: Utilización cuando se emplea predicción estocástica en escenario monoservicio.

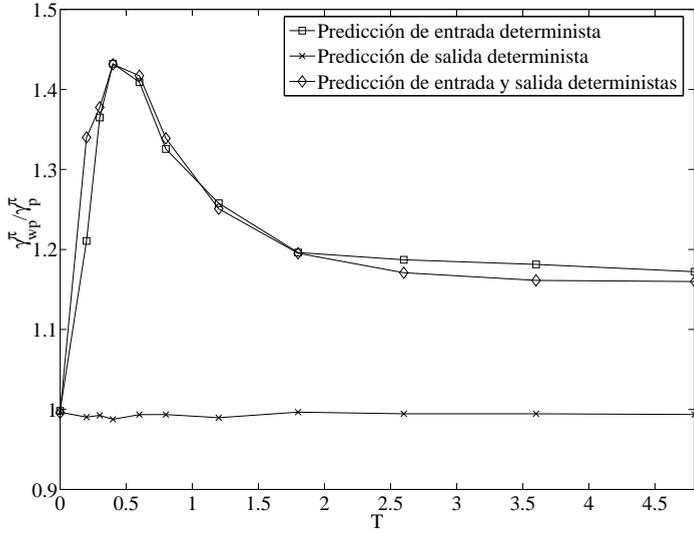
mente, en esta sección las sesiones se etiquetan T unidades de tiempo antes del momento en el que el *handover* ha sido estimado. Es decir, de forma que en un momento dado t_0 se conocerá el número de sesiones que se estima que van a realizar un *handover* en $[t_0, t_0 + T]$. Se ha empleado tanto la predicción de entrada, como de salida como ambas simultáneamente. Los resultados se muestran en la Fig. 4.16, donde se analiza cómo cambia la ganancia de la política óptima respecto a cuando no se emplea predicción para diferentes valores de T y para dos valores de la incertidumbre, $I = \{0, 0.2\}$. Como se puede observar, existe un valor óptimo de T en el que se produce la ganancia máxima. Conforme T aumenta desde su valor óptimo, la ganancia decrece debido a que la información temporal se vuelve menos precisa. Como cabía esperar, cuando $T \rightarrow \infty$ la ganancia es la misma a la conseguida para esos valores de la incertidumbre al emplear predicción estocástica (Fig. 4.14).

Cuando T es inferior a su valor óptimo, la ganancia también decrece, debido a que el sistema no tiene suficiente tiempo a reaccionar. Cuando $T = 0$ la ganancia es nula porque, en realidad, no existe predicción. Finalmente, hay que notar que la información que aporta la predicción de salida no es relevante tampoco cuando se emplea predicción determinista del tipo descrito en este trabajo. Aunque en [SK06] se concluye que el empleo de información predictiva relativa a los *handovers* salientes en una ventana permite el cálculo de políticas CAS más eficientes, aquí no se obtienen los mismos resultados por dos motivos. Por una parte, tal y como se especifica en la sección 4.2.2, en [SK06] los *handovers* entrantes y los salientes se ordenan para determinar el momento en el que se deben reservar más recursos para la siguiente ventana temporal. En el caso que nos ocupa no se considera el instante temporal de cada *handover* dentro de la ventana determinista, por lo que, en cualquier caso, la aportación a la política CAS debería ser inferior a la obtenida en [SK06]. Por otra parte, el motivo que parece más importante es por la diferente metodología en el diseño de la política CAS. En [SK06] se hace de forma heurística y se reservan recursos en función de las necesidades estimadas, donde es indudable que no saber cuantos *handovers* van a salir puede conducir a un reserva de recursos excesiva. Sin embargo, en este trabajo la política obtenida ya considera en el aprendizaje el hecho de que algunas sesiones abandonarán la célula, puesto que es una característica del sistema del que aprende.

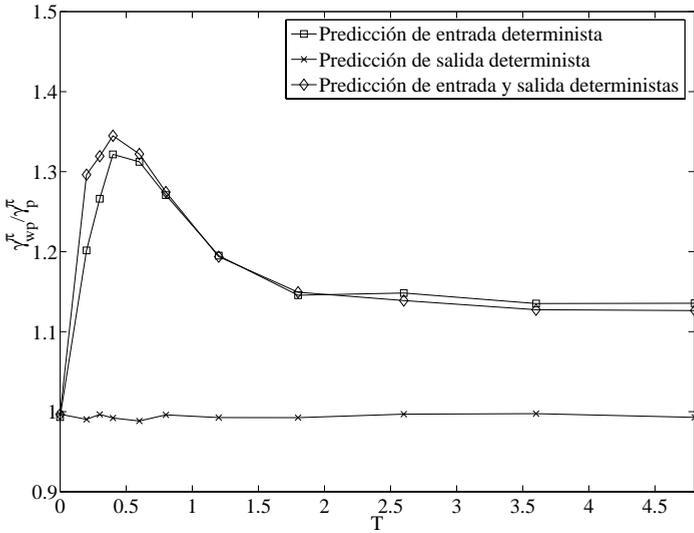
Por otra parte, conviene conocer el efecto que la predicción determinista tiene en la utilización del sistema. Al igual que ocurría en la predicción estocástica, en la Fig. 4.17 se muestra que la utilización no cambia al emplear predicción de movimiento determinista.

4.6.3 Evaluación comparativa

En esta sección se comparan las prestaciones de las políticas CAS obtenidas mediante RL y las prestaciones del esquema predictivo propuesto en [CS02]. Aunque el esquema predictivo propuesto en [CS02] se aplica a un escenario de dos servicios mantiene las limitaciones de un sistema monoservicio, ya

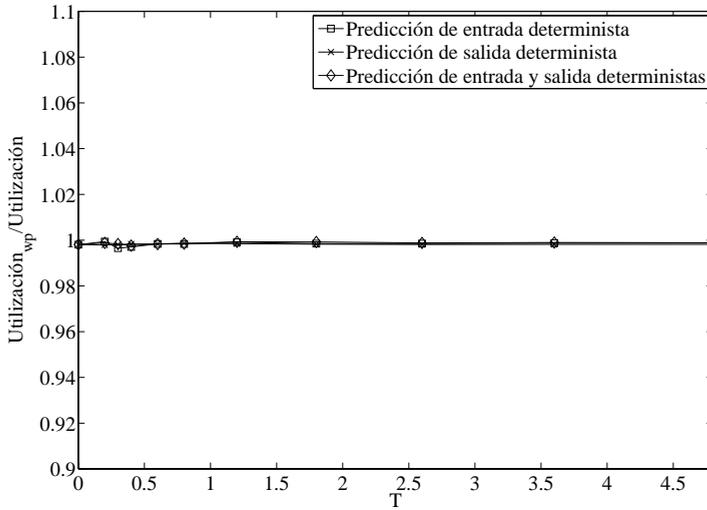


(a) $I = 0$.

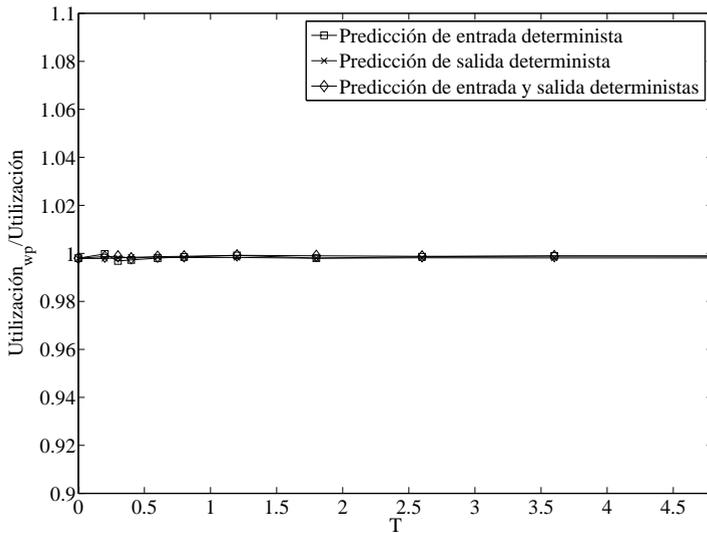


(b) $I = 0.2$.

Figura 4.16: Predicción determinista en escenario monoservicio.



(a) $I = 0$.



(b) $I = 0.2$.

Figura 4.17: Utilización cuando se emplea predicción estocástica en escenario monoservicio.

que no distingue entre los diferentes servicios en el proceso de CAS ni en los parámetros de prestaciones obtenidos. Por ese motivo, la comparación con la propuesta RL que se hace en el presente trabajo, que puede aplicarse tanto en monoservicio como en multiservicio, se hace en un escenario monoservicio. El escenario empleado ha sido el mismo que en la sección 4.6.2 excepto que se ha empleado $\lambda_T = 3.5$ y también se ha modificado ω^h , tomando diferentes valores.

Entre los 3 esquemas CAS propuestos en [CS02] (AC1, AC2 y AC3) se ha escogido AC1 en lugar de AC2 o AC3 porque permite usar el mismo escenario empleado hasta ahora, haciendo la comparación más justa. Además, en [SK06] los autores evalúan las prestaciones de los tres esquemas, concluyendo que las mejores prestaciones las ofrece AC1.

Tal y como se especifica en la sección 4.2.2, el esquema de predicción de movimiento propuesto en [CS02] estima el número de unidades de recurso que deben ser reservados en cada célula para los *handovers* que van a tener lugar en una ventana de tiempo de duración T_{est} . Si se denota como C0 la célula en estudio y como C_i las células vecinas, el número de recursos que deben reservarse en C0 para los *handovers* que llegan desde la célula vecina C_i es $B_{r,0}^i = \sum_{j \in C_i} b(C_{i,j}) p_h(C_{i,j} \rightarrow 0)$, donde $b(C_{i,j})$ es el número de unidades de recurso requeridas por la sesión j -ésima de la célula i y $p_h(C_{i,j} \rightarrow 0)$ es la probabilidad estimada que la sesión $C_{i,j}$ sea traspasada hacia C0 en menos de T_{est} unidades de tiempo. El número total de recursos que deberían reservarse en C0 es $B_{r,0} = \sum_{i \in A_0} B_{r,0}^i$, donde A_0 es el conjunto de índices de las células vecinas de C0.

En el escenario de evaluación considerado en este trabajo se tiene la célula en estudio (C0) y sus inmediaciones (Cg), por lo que se puede estimar $B_{r,0}$ como $B_{r,0} = \sum_{j \in C_g} b(C_{g,j}) p_h(C_{g,j} \rightarrow 0)$, donde $p_h(C_{g,j} \rightarrow 0)$ es la probabilidad estimada de que la sesión $C_{g,j}$ sea traspasada a C0 en menos de T_{est} unidades de tiempo.

Los autores de [CS02] proponen estimar $p_h(C_{i,j} \rightarrow 0)$ por medio de una base de datos que almacena el patrón de los movimiento históricos de los

usuarios. Además, cada estación base conoce el tiempo existente de residencia de cada usuario. El tiempo existente de residencia de la conexión $C_{i,j}$, $T_{ext-soj}(C_{i,j})$, es el tiempo transcurrido desde que el terminal activo con la conexión $C_{i,j}$ entró a la célula C_i .

En el escenario que se está estudiando, la probabilidad $p_h(C_{g,j} \rightarrow 0)$ puede determinarse mediante:

$$p_h(C_{g,j} \rightarrow 0) = P(C_{g,j} \rightarrow 0) \cdot P(\hat{t}_r \leq T_{est} + T_{ext-soj} | \hat{t}_r > T_{ext-soj}),$$

donde \hat{t}_r es el tiempo de residencia en el vecindario de las sesiones que van a realizar un *handover*. El factor $P(C_{g,j} \rightarrow 0)$ representa la probabilidad de que una sesión en el vecindario que ejecute un *handover* lo haga hacia C_0 , es decir, el parámetro S_H en el modelo considerado en este trabajo. El otro factor representa la probabilidad de que una sesión ejecute un *handover* siendo que el tiempo en el vecindario es ya superior a $T_{ext-soj}$ y lo vaya a hacer en menos de T_{est} unidades de tiempo desde el instante actual. Para determinar este segundo factor se hace uso del Lema 1, el cual justifica que la distribución del tiempo de residencia en el vecindario de las sesiones que ejecutarán un *handover* \hat{t}_r está también distribuido exponencialmente con tasa $\mu^p + \mu^s$. Por lo tanto, dada la propiedad de memoria nula de la distribución exponencial se cumple que

$$P(\hat{t}_r \leq T_{est} + T_{ext-soj} | \hat{t}_r > T_{ext-soj}) = P(\hat{t}_r \leq T_{est}) = 1 - e^{-(\mu^s + \mu^p)T_{est}}.$$

Conforme el número de registros históricos (N_{quad}) de la base de datos propuesta en [CS02] crece, el valor de $p_h(C_{g,j} \rightarrow 0)$ tenderá a la probabilidad real. En la comparación que aquí se realiza se considera $N_{quad} \rightarrow \infty$ y, por lo tanto, la estimación de movimiento realizada en [CS02] puede realizarse mediante

$$p_h(C_{g,j} \rightarrow 0) = S_H (1 - e^{-(\mu^s + \mu^p)T_{est}}).$$

De este modo, las prestaciones del esquema AC1 que se obtienen se pueden considerar como un límite superior de la implementación realizada en [CS02].

Los valores de T_{est} para cada célula se pueden ajustar dinámicamente basándose en la probabilidad de terminación forzosa observada. Cuando una nueva sesión llega a C_0 , el esquema AC1 realiza el siguiente test de admisión: si $\sum_{j \in C_0} b(C_{0,j}) + b_{new} \leq C - B_{r,0}$ se admite, rechazándose en cualquier otro caso, donde b_{new} es el número de recursos requeridos por la sesión que hace la petición de admisión.

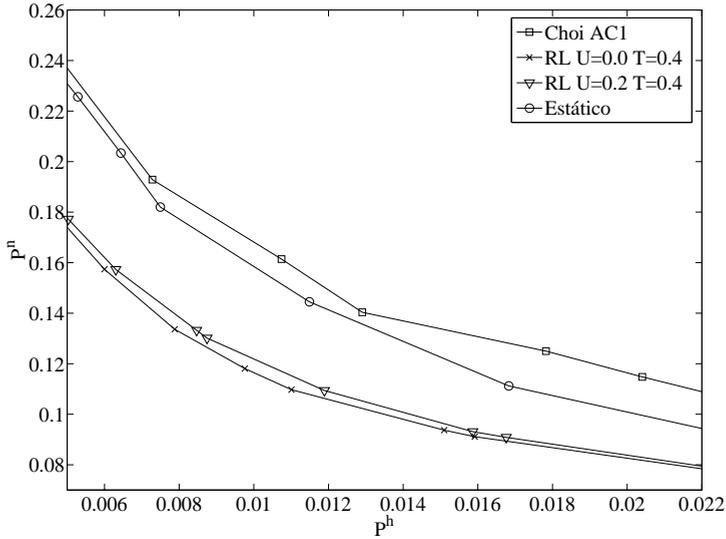


Figura 4.18: Comparación de esquemas de predicción.

La Fig. 4.18 compara las prestaciones del esquema AC1 con las prestaciones de diferentes políticas obtenidas mediante RL y predicción entrante determinista. Los diferentes puntos de RL se han obtenido usando diferentes valores para ω^h . También se incluye como referencia las prestaciones de una política estática, que en este caso es una política del tipo FGC. Aunque podría resultar sorprendente que una política estática tengas mejores prestaciones que AC1, debe destacarse que para la correcta determinación del número óptimo de canales reservados se requiere conocer parámetros de trá-

fico como las tasas de llegada y los tiempos de ocupación de los recursos, los cuales no son necesarios para el esquema AC1.

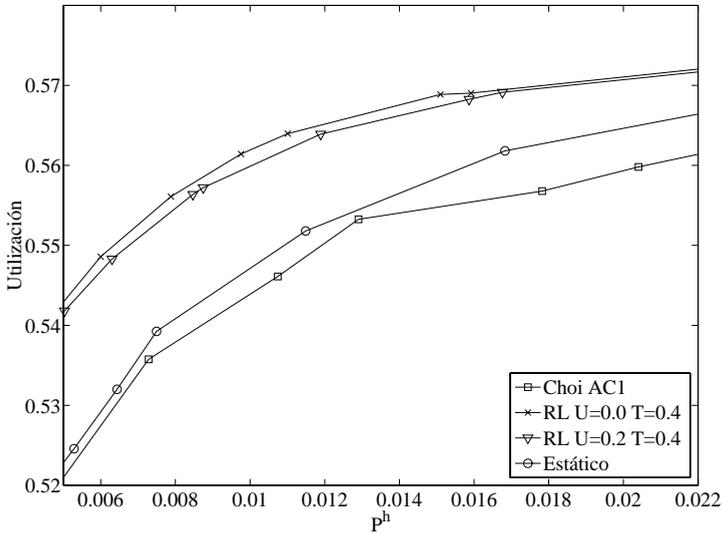


Figura 4.19: Comparación de la utilización empleando diferentes esquemas de predicción.

Finalmente la Fig. 4.19 compara la utilización de los recursos que realizan las diferentes propuestas. Resulta evidente que las prestaciones de las políticas obtenidas mediante RL superan ampliamente a las obtenidas mediante AC1, lo que demuestra que todavía se puede mejorar mucho en el desarrollo de esquemas de predicción de movimiento.

4.7 Redes celulares multiservicio

En esta sección se evalúan diferentes aspectos de la metodología RL propuesta así como de las políticas CAS obtenidas en escenarios multiservicio.

A partir de la sección anterior, se ha determinado que la información predictiva más útil de entre las consideradas es la predicción determinista de *handovers* entrantes, por lo que será la considerada exclusivamente en esta sección. No obstante, se han empleado los otros tipos de predicción en escenarios multiservicio, como se puede apreciar en [GGMBP07]. Sin embargo, no se incluyen esos resultados por ser cualitativamente muy similares a los obtenidos en monoservicio. Se ha preferido centrar la atención en otros aspectos diferentes. En todos los casos en los que se considera un escenario de dos servicios ($N = 2$) se ha tomado que las llegadas de *handovers* del servicio dos constituyen el flujo más prioritario, estando el resto de parámetros definidos del siguiente modo: $C = 50$, $C_p = 100$, $b = \{1, 2\}$, $\mu = \{1, 3\}$, $N_i^h = 1$, $f_i = \{0.8, 0.2\}$ y $\lambda_T = 20$. Los pesos relativos al bloqueo de una petición nueva o *handover* son $\omega_1^n = 1$, $\omega_2^n = 2$, $\omega_1^h = 20$ y $\omega_2^h = 40$. La fase exploratoria de RL se ha configurado por defecto de un modo conservador, siendo $p_0 = 0.3$ y $\phi = 10^{13}$. Finalmente, el clasificador se ha configurado con $I = 0.2$.

4.7.1 Representación del estado del sistema

Si se considera que el tiempo de ocupación de los recursos está distribuido exponencialmente y que el número de servicios es $N = 2$, una primera aproximación para representar el espacio de estados del sistema sería

$$\mathcal{S} := \{ \mathbf{x} = (x_1, x_2, x_1^{in}, x_2^{in}) : x_i \leq C; x_i^{in} \leq C_p \},$$

donde x_i , $i = \{1, 2\}$, representa el número de recursos ocupados por las sesiones del servicio i en la célula, independientemente de si fueron iniciadas como sesiones nuevas o *handovers* debido a la propiedad de memoria nula de las exponenciales, y x_i^{in} representa el número de recursos del servicio i etiquetados como H en las inmediaciones que se prevé van a ejecutar un *handover* a la célula en estudio en menos de T unidades de tiempo. El objetivo de esta sección es explorar la posibilidad de obtener representaciones del estado que reduzcan la cardinalidad de \mathcal{S} manteniendo las prestaciones, ya que el

espacio de estados así considerado presenta un gran número de estados y una mala escalabilidad conforme se aumenta el número de servicios.

Estado de la célula

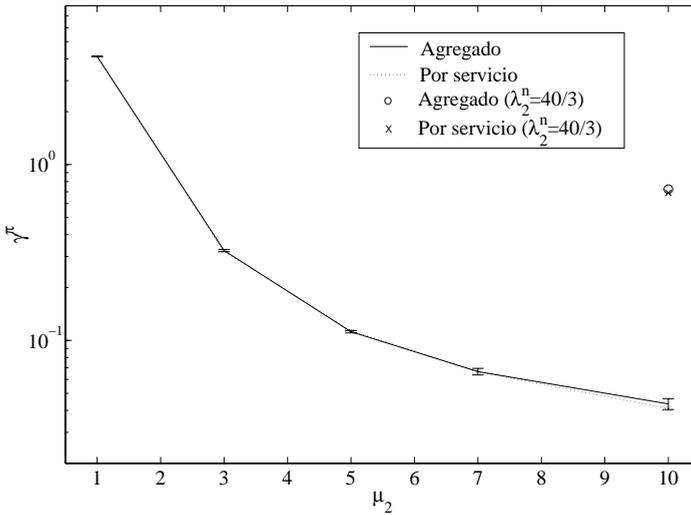


Figura 4.20: Representación del estado de la célula.

El primer paso para tratar de reducir el espacio de estados es determinar la política óptima en un sistema que no considera información predictiva. Se consideran dos posibles representaciones del estado del sistema, a los que se denomina “por servicio” y “agregado”, respectivamente

$$S := \{x = (x_1, x_2) : x_i \leq C\},$$

$$S := \{x = (x_0) : x_0 \leq C\},$$

donde $x_i, i = \{1, 2\}$ denota el número de recursos ocupados por las sesiones en curso del servicio i en la célula y x_0 el número total de recursos ocupados en la célula. Manteniendo el resto de parámetros constantes, la Fig. 4.20

muestra la variación del coste medio γ^π considerando ambas representaciones conforme cambia el tiempo medio de ocupación de los recursos del servicio 2, μ_2 , es decir, incrementando la heterogeneidad entre los servicios. Como se puede observar, γ^π es casi idéntica en ambos escenarios. Como el incremento de μ_2 reduce el tráfico ofrecido al sistema por el servicio 2, también se muestra el valor de γ^π para $\mu_2 = 10$ (el peor caso, es decir, cuando los valores de γ^π difieren más) pero ajustando λ_2^H convenientemente para mantener el mismo tráfico ofrecido por el servicio 2 como cuando $\mu_2 = 3$. Como en el caso anterior, γ^π toma casi el mismo valor en las dos representaciones del estado del sistema. Por lo tanto, de ahora en adelante y para el resto de experimentos, se empleará la representación agregada del estado de la célula en estudio.

Estado de las inmediaciones

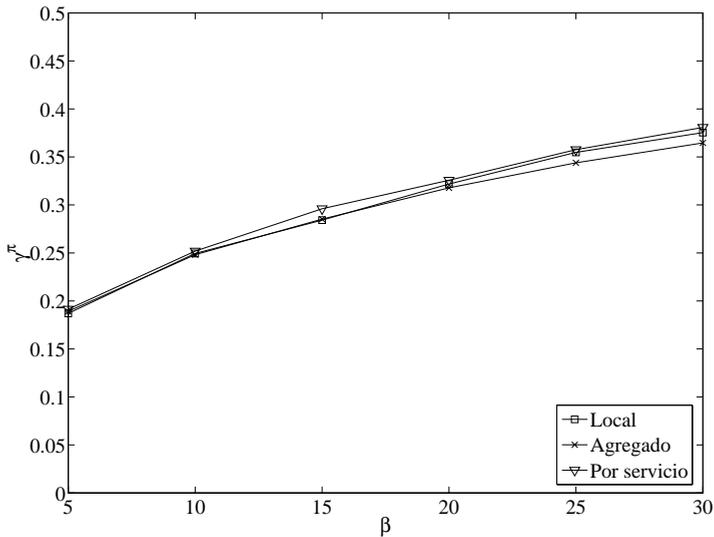


Figura 4.21: Representación del estado de las inmediaciones.

Se va a analizar un sistema en el que no se considera información de predicción de movimiento sino únicamente el estado de ocupación de los alrededores, de forma similar a como se hace en [YR97]. Para el vecindario se han considerado diferentes opciones, de forma análoga a como se ha hecho en la elección del estado de la célula en estudio. Así, las representaciones “por servicio” y “agregada” tienen los siguientes espacios de estado:

$$\begin{aligned} \mathcal{S} &:= \{x = (x_0, y_1, y_2) : x_i \leq C\}, \\ \mathcal{S} &:= \{x = (x_0, y) : x_0 \leq C\}, \end{aligned}$$

donde y_i representa el número de recursos ocupados por sesiones del servicio i en el vecindario e $y = y_1 + y_2$. x_0 es el número de recursos ocupados en la célula en estudio. En la Fig. 4.21 se observan los resultados en este escenario que no considera información predictiva, siendo $\beta = \omega_i^h / \omega_i^n$, es decir, el peso que se le da a los *handovers* sobre las sesiones nuevas de su mismo servicio. Por otra parte, se ha mantenido la relación del peso de perder una sesión del servicio 2 respecto al servicio 1 a su valor de 2 ($\omega_2^n / \omega_1^n = \omega_2^h / \omega_1^h = 2$). La curva denominada *local* pertenece al escenario en el que únicamente se considera información agregada de la célula en estudio.

Los resultados muestran que, aunque la función a optimizar sea la suma ponderada de tasas de pérdidas y no de las probabilidades de pérdidas y aunque sea un escenario multiservicio en lugar de un escenario monoservicio como se plantea en [YR97], el empleo de información de ocupación de los alrededores no aporta ninguna ganancia significativa.

Estado de la información predictiva

Se exploran ahora tres representaciones diferentes de la información predictiva relativa a los *handovers* entrantes. Estas tres maneras se denominan “por servicio”, “agregada” y “ponderada”, y sus espacios de estados respectivos

son

$$\begin{aligned}
 \mathcal{S} &:= \{ \mathbf{x} = (x_0, x_1^{in}, x_2^{in}) : x_0 \leq C; x_j^{in} \leq C_p \}, \\
 \mathcal{S} &:= \{ \mathbf{x} = (x_0, x_{in}) : x_0 \leq C; x_{in} \leq C_p \}, \\
 \mathcal{S} &:= \{ \mathbf{x} = (x_0, x_{in}^\omega) : x_0 \leq C; x_{in}^\omega \leq \kappa C_p \},
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

donde x_0 es el número de recursos ocupados en la célula en estudio, x_i^{in} es el número de recursos del servicio i ($i = \{1, 2\}$) etiquetados como H en el vecindario, x_{in} es la suma $x_{in} = \sum_{j=1}^N x_j^{in}$ y x_{in}^ω es la suma ponderada de recursos etiquetados como H en el vecindario. Se define $\kappa = \omega_2^h / \omega_1^h = 2$ y $x_{in}^\omega = x_1^{in} + \kappa x_2^{in}$. La lógica de la representación ponderada es que al controlador de admisión se le provea, además, con la importancia de la información predictiva.

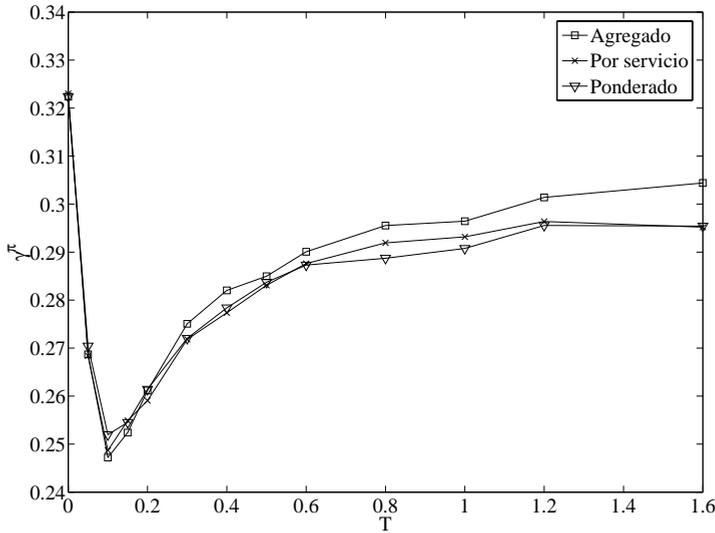


Figura 4.22: Representación de la información predictiva.

La Fig. 4.22 muestra el valor del coste medio conforme se modifica T de la política óptima calculada con las tres formas de representar la información

predictiva expuestas anteriormente. Resulta evidente que la representación ponderada ofrece un buen balance entre precisión y cardinalidad del espacio de estados, ya que, mientras que las prestaciones son casi idénticas a las que ofrece la representación por servicio, la cardinalidad de su espacio de estados es muy inferior. Más específicamente, la representación ponderada ofrece la ventaja de ser insensible al número de servicios, ya que únicamente depende del diferente peso que se le dé a unos servicios sobre otros. Por todos esos motivos, la representación ponderada se empleará a partir de ahora en el resto de este trabajo. Con respecto a la forma de las diferentes curvas, destaca la presencia de un valor óptimo para T , para el que se obtiene un coste mínimo, de forma similar a los resultados obtenidos en escenarios monoservicio.

4.7.2 Evaluación del uso de post-estados

Una vez definida la representación del estado del sistema que se va a emplear, en esta sección se evalúa el uso de post-estados en el diseño de políticas CAS con esa definición del espacio de estados. Además, se estudiarán escenarios de mayor complejidad al empleado en la sección 4.5.

Escenario de dos servicios sin predicción

La Fig. 4.23 muestra el coste medio y los intervalos de confianza al 95% de las políticas óptimas cuando no se emplea predicción que se consiguen cuando se emplean y no se emplean post-estados conforme se incrementa la exploración (ϕ) en el proceso de aprendizaje. Los resultados obtenidos al usar post-estados mejoran ampliamente a los obtenidos mediante RL convencional en dos aspectos: consiguen mejores soluciones y con unos intervalos de confianza mucho menores. De este modo, las ganancias son de alrededor del 20% de mejora al introducir post-estados. Modificar ϕ en un rango tan amplio permite prácticamente descartar la idea de que RL convencional no obtiene políticas mejores por la falta de exploración del espacio de estados. Además, se observa como el empleo de post-estados nos conduce a las

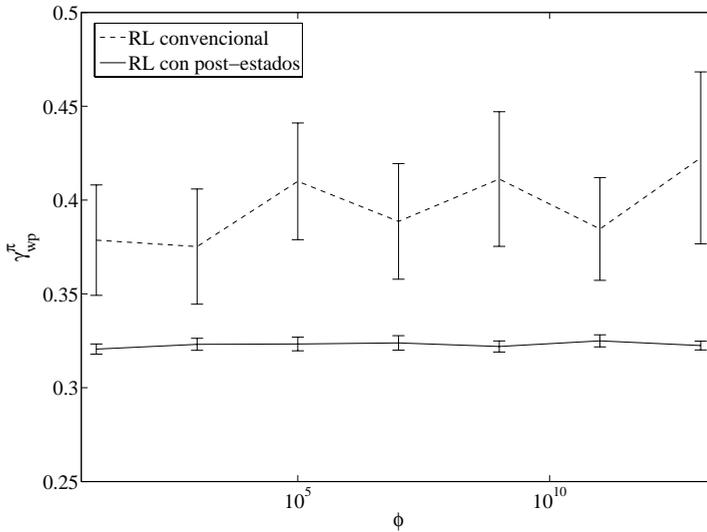
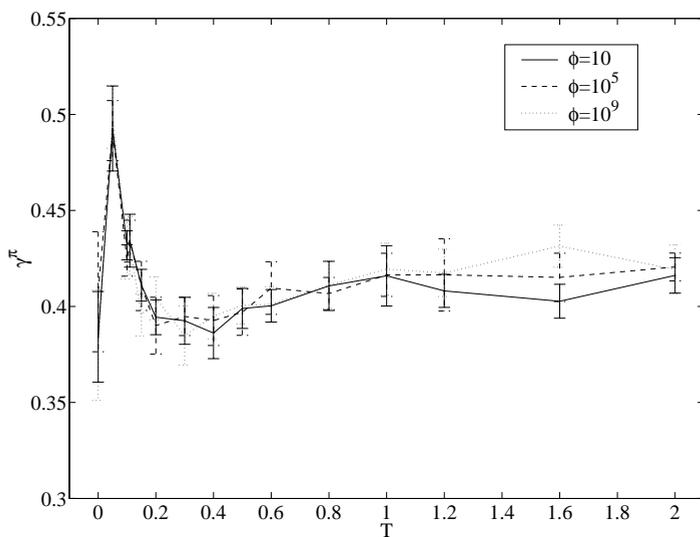


Figura 4.23: Empleo de post-estados en escenario de dos servicios sin información predictiva.

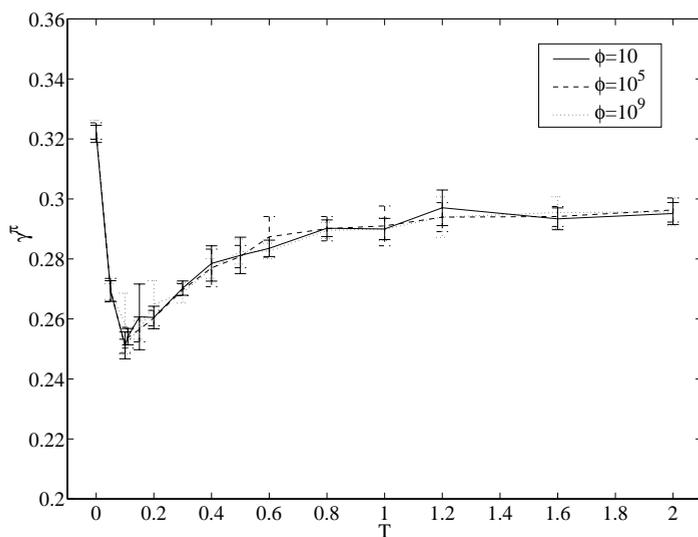
mismas soluciones independientemente del valor de ϕ .

Escenario de dos servicios con predicción de entrada determinista

Una vez evaluado el uso de post-estados en un escenario multiservicio sin predicción, ahora se va a analizar cómo se comporta cuando se le informa al controlador de admisión acerca del número de *handovers* entrantes que van a tener lugar en menos de T unidades de tiempo. En la Fig. 4.24 se muestra el coste medio de las políticas óptimas cuando se emplean post-estados y cuando no se hace. Los resultados muestran que RL convencional tiene una efectividad menor, ya que incluso calcula peores políticas cuando se le suministra información predictiva. Esto se debe a que no es capaz de manejar correctamente el incremento de complejidad del proceso de optimización, como sí hace RL con post-estados. Asimismo, en RL con post-estados se



(a) Sin post-estados.



(b) Con post-estados.

Figura 4.24: Empleo de post-estados en escenario de dos servicios con predicción de entrada determinista.

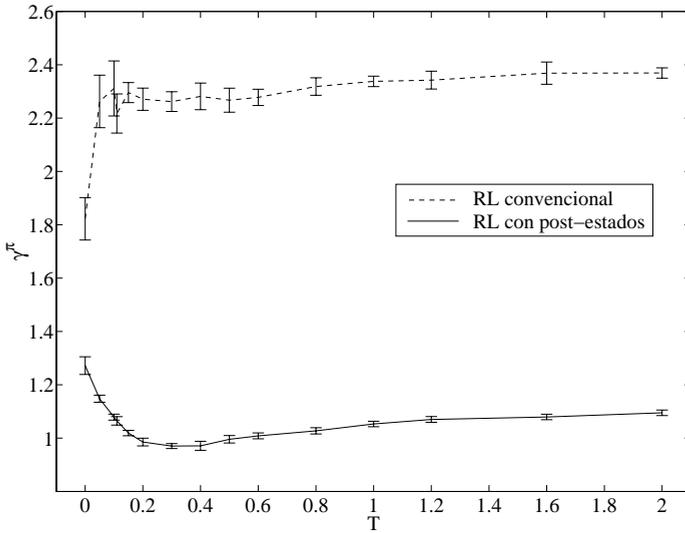
muestra como la elección de la fase de exploración no es importante, ya que los resultados son parecidos incluso empleando rangos de exploración muy amplios.

Escenario de cuatro servicios con predicción de entrada determinista

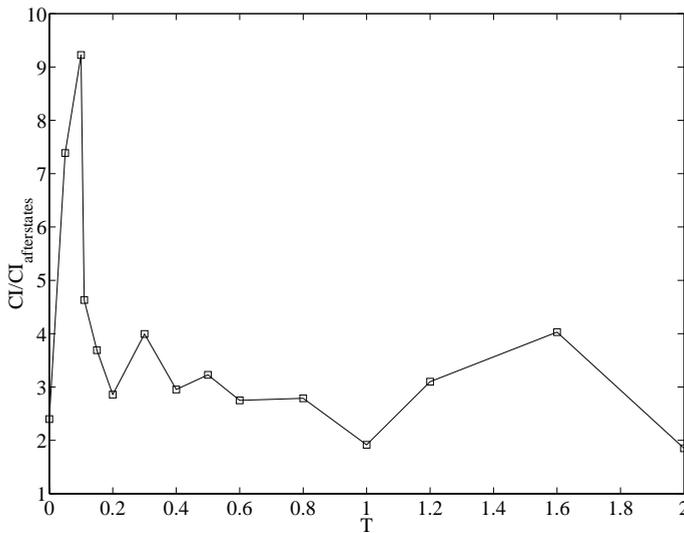
Aunque RL convencional se ha mostrado poco efectivo, se va a realizar una última comparación en un escenario de cuatro servicios, para mostrar la efectividad tanto del esquema RL con post-estados respecto a RL convencional así como para mostrar que la elección del espacio de estados ponderado para la predicción junto con los post-estados permite diseñar políticas CAS para redes multiservicio con un número de servicios arbitrario. El escenario escogido tiene los siguiente parámetros: $N = 4$ servicios, $C = 50$, $C_p = 100$, $b = \{1, 2, 4, 6\}$, $N_i^h = 1$ y $\mu_i = 1$. Los pesos asociados a los bloqueos de sesiones nuevas y *handovers* son, respectivamente, $\omega_i^n = \{1, 2, 4, 8\}$ y $\omega_i^h = \{20, 40, 80, 160\}$, por lo que $\kappa = 8$. La generación de sesiones del servicio i viene dada por $\lambda_i^{nc} = f_i \lambda_T$, siendo f_i el valor normalizado de $\varphi_i = \chi^{i-1}$ y usando $\chi = 0.2$. Asimismo, para la exploración se ha empleado $p_0 = 0.3$ y $\phi = 10^5$, aunque también se ha probado con otros valores obteniéndose los mismos resultados. La elección de λ_T se ha hecho de modo que se mantenga la carga media de sesiones nuevas ofrecidas por recurso que se tiene en el escenario de 2 servicios de la sección anterior, y definiendo esta como:

$$\sigma = \frac{1}{C} \sum_{n=1}^N \frac{\lambda_n}{\mu_n} b_n = \frac{\lambda_T}{C} \sum_{n=1}^N \frac{f_n}{\mu_n} b_n.$$

Los resultados de la Fig. 4.25 se muestran en dos aspectos. Por una parte, en la Fig. 4.25(a) se aprecia como las políticas CAS obtenidas mediante RL con post-estados tienen un coste muy inferior a las obtenidas mediante RL convencional. Además, el empleo de RL convencional de la manera empleada no resulta útil cuando se añade información predictiva en este escenario. Por otra parte, analizando el cociente de los intervalos de confianza al 95% de ambos métodos, se puede concluir que los resultados de RL con post-estados en las diferentes simulaciones ofrecen resultados mucho más estables.



(a) Coste.



(b) Ancho relativo de los intervalos de confianza.

Figura 4.25: Empleo de post-estados en escenario de cuatro servicios con predicción de entrada determinista.

4.7.3 Tiempo de anticipación óptimo

Como se ha visto hasta ahora, cuando se emplea predicción determinista de *handovers* entrantes existe un valor óptimo del tiempo de anticipación T . Puesto que una configuración adecuada de este parámetro puede resultar de interés para el diseño de esquemas de predicción de movimiento, en esta sección se va a realizar un análisis de su sensibilidad frente a varios parámetros característicos del sistema así como un análisis de su robustez cuando no se estima de forma exacta.

Análisis de sensibilidad

En esta sección se estudia la variación del valor óptimo de T en el cual se produce el máximo de ganancia cuantificada como el cociente $\gamma_{wp}^{\pi} / \gamma_p^{\pi}$ con diferentes parámetros del sistema como: la carga ofrecida al sistema (λ_T), el número de recursos del sistema (C), la distribución del tiempo de residencia en la célula (μ^r) y en las inmediaciones (μ^p) y la movilidad de los terminales (N_i^h).

Carga del sistema:

Manteniendo el resto de parámetros constantes, la Fig. 4.26 muestra la variación de la ganancia para tres valores diferentes de la carga del sistema, $\lambda_T = \{18, 20, 22\}$. Aunque las probabilidades de bloqueo aumentan conforme aumenta λ_T , las tres cargas del sistema seleccionadas producen probabilidades de bloqueo realistas. Como se puede observar, el valor óptimo de T es independiente de la carga del sistema, aunque la ganancia óptima decrece conforme se incrementa la carga en el sistema.

Número de recursos:

Manteniendo la carga por unidad de recurso constante, la Fig. 4.27 muestra la variación de la ganancia con T para tres valores diferentes del número de

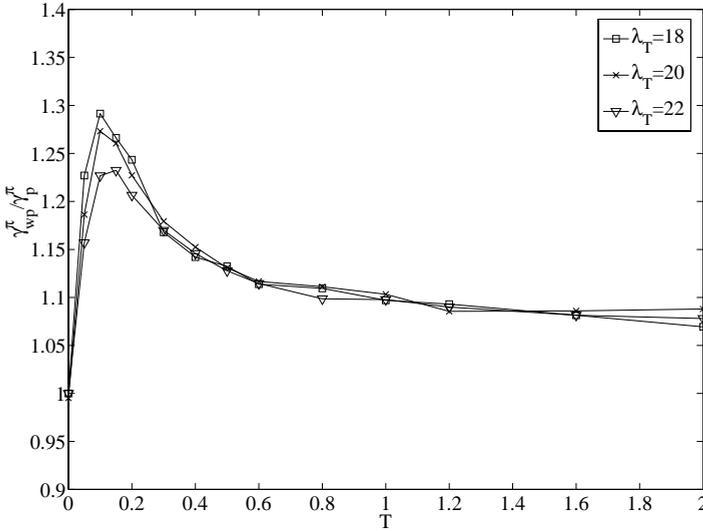


Figura 4.26: Sensibilidad de T frente a la carga del sistema.

recursos en la célula, $C = \{30, 40, 50\}$. Obviamente, será necesario incrementar λ_T para mantener constante la carga por recurso si se aumenta el número de estos. Como puede observarse, el valor óptimo de T decrece ligeramente conforme el número de recursos decrece. Esto puede deberse al hecho de que en un sistema con más unidades de recurso los recursos se liberan con una tasa superior y, consecuentemente, el sistema CAS es capaz de reservar los recursos necesarios para los *handovers* predichos con un menor tiempo de anticipación. También debe notarse que el valor máximo de la ganancia también decrece conforme lo hace el número de recursos. Sin embargo, en redes limitadas por interferencia el número de recursos se espera que se modifique únicamente en la fase de diseño y planificación de red, por lo que la pequeña variación del valor óptimo de T con el número de recursos no afectará. Por otra parte, en redes de capacidad variable como las CDMA sí que podría afectar, aunque no se esperan efectos importantes ya que la va-

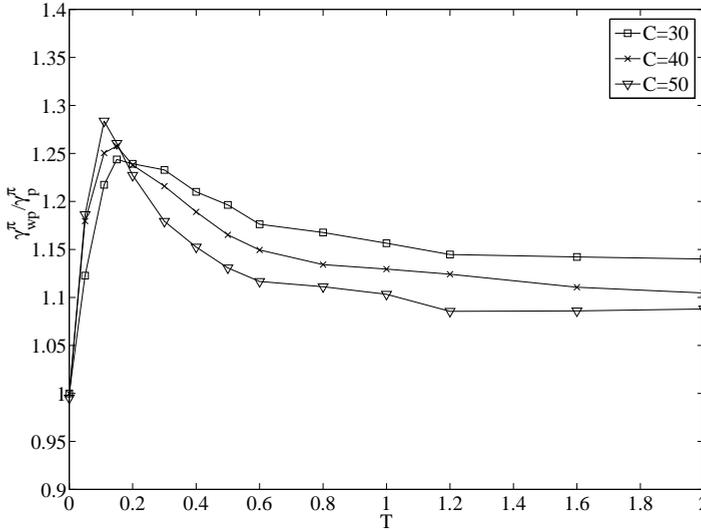
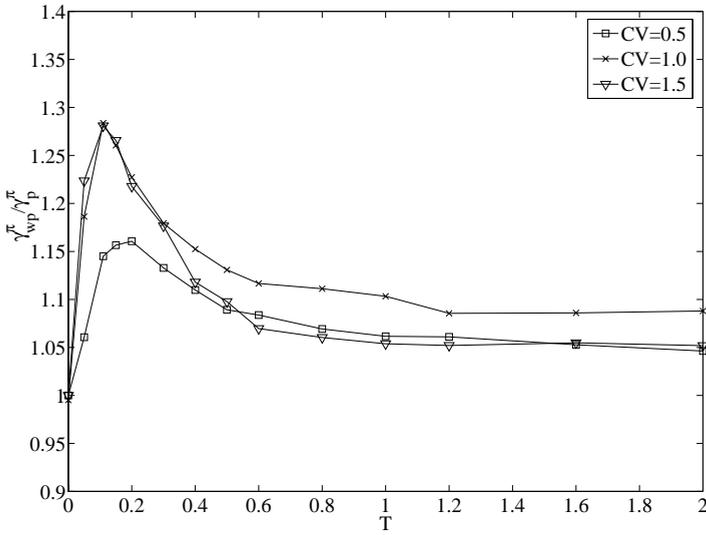


Figura 4.27: Sensibilidad de T frente al número de recursos.

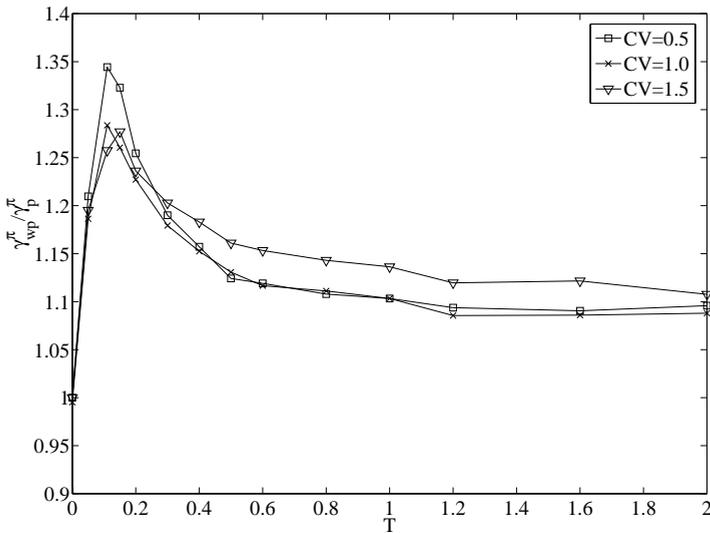
riación del valor óptimo de T óptimo en un amplio rango de valores de C es pequeña.

Distribución del tiempo de residencia:

Además de la distribución exponencial se han considerado otras distribuciones con diferentes coeficientes de variación para caracterizar el tiempo de residencia. Sin embargo, aunque desde un punto de vista operativo el empleo de distribuciones no exponenciales es trivial cuando se emplean técnicas de optimización de MDP basadas en simulación como RL, hay que ser muy cauto con su uso. Así, si no se tiene la propiedad de memoria nula para las sesiones en curso, hay que introducir de algún modo en el estado del sistema el tiempo transcurrido de cada sesión para garantizar soluciones óptimas, incrementando así tanto la cardinalidad del espacio de estados como la complejidad del problema. Si como en el presente trabajo no se hace ese aumento

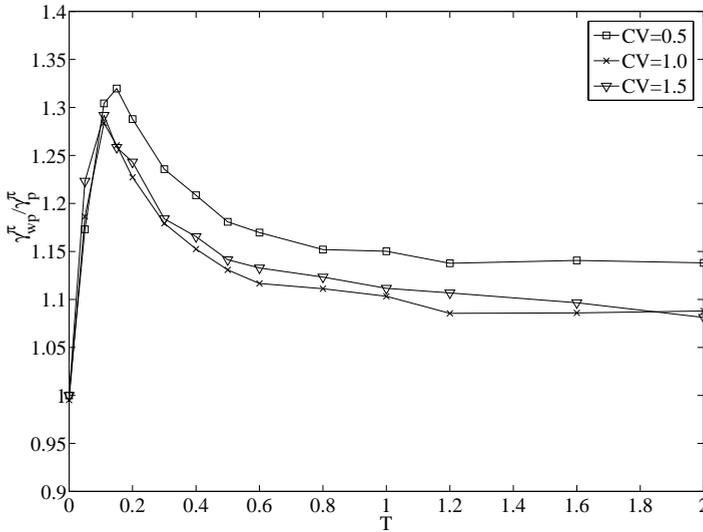


(a) En la célula.



(b) En las inmediaciones.

Figura 4.28: Sensibilidad de T frente a la distribución del tiempo de residencia (I).



(a) En la célula y en las inmediaciones.

Figura 4.29: Sensibilidad de T frente a la distribución del tiempo de residencia (II).

y se consideran tiempos no exponenciales el proceso resultante no es markoviano, por lo que no se puede garantizar que las soluciones obtenidas sean óptimas.

Además de la distribución exponencial ($CV = 1$) se ha considerado la distribución erlanguiana ($0 < CV < 1$) y la hiperexponencial ($CV > 1$). Usando estas distribuciones, se ha evaluado la ganancia obtenida para tres valores del CV del tiempo de residencia, siendo $CV = \{0.5, 1.0, 1.5\}$. La Fig. 4.28(a) muestra el impacto en las prestaciones del CV de la distribución del tiempo de residencia en la célula, mientras que las inmediaciones siguen teniendo un tiempo de residencia modelado mediante una distribución exponencial. La Fig. 4.28(b) muestra los resultados para un escenario complementario en el que el tiempo de residencia en la célula en estudio es exponencial, pero

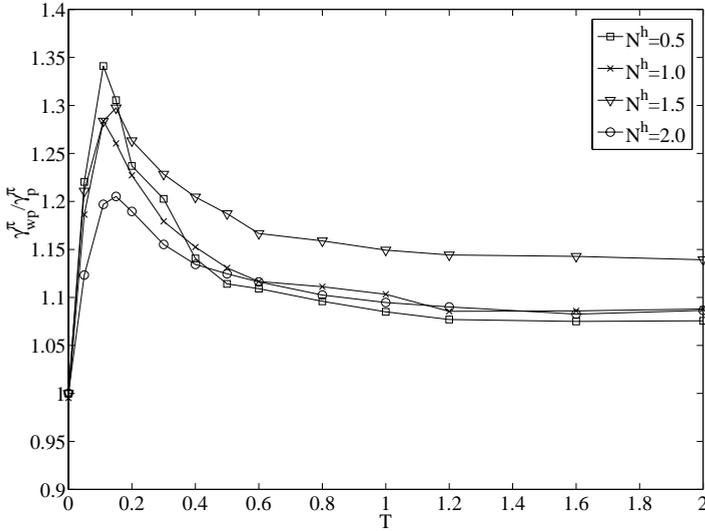


Figura 4.30: Sensibilidad de T frente a la movilidad de los terminales.

en las inmediaciones emplea distribuciones con diferentes CV. Finalmente, se estudia un escenario en el que se considera la misma distribución para el tiempo de residencia tanto en la célula en estudio como en las inmediaciones. La Fig. 4.29 muestra los resultados para este último escenario. En todos los casos, la media del tiempo de residencia, es decir, $1/\mu_i^r$ y $1/\mu_i^p$, se mantienen constantes e iguales a los valores empleados en los experimentos realizados hasta ahora. Los resultados muestran que el valor de T óptimo permanece constante en todos los escenarios estudiados. Por otra parte, y aunque el objetivo principal era evaluar la sensibilidad del valor óptimo de T , también se puede evaluar qué le ocurre a la ganancia para diferentes valores del CV. En ese sentido, no se observa una tendencia fija con el CV, por lo que haría falta un estudio más profundo para obtener conclusiones.

Movilidad de los terminales:

En esta sección se estudia la variación de la ganancia conforme varía T para cuatro valores de movilidad de los terminales $N_i^h = \{0.5, 1.0, 1.5, 2.0\}$, manteniendo μ_i constante. Aunque la tasa de *handovers* entrantes desde fuera del sistema (λ_i^{ho}) depende de la movilidad de los terminales (μ_i^r / μ_i^s) se ha mantenido λ_i^{ho} constante e igual al escenario por defecto. Los resultados se muestran en la Fig. 4.30. De nuevo, el valor óptimo de T permanece invariante a la movilidad de los terminales. Finalmente, debe notarse que el valor de la ganancia para el valor de T óptimo no sigue una tendencia clara. Este comportamiento también se ha observado en [Pla05, PGMBCG04], donde los resultados son para escenarios monoservicio y predicción de entrada estocástica empleando DP como mecanismo de diseño de políticas CAS.

Análisis de robustez

Hasta el momento se ha considerado un conocimiento preciso del instante en el que un *handover* va a tener lugar. Obviamente, esta suposición no se da en la realidad. Por ese motivo, en esta sección se analizan las consecuencias de no conocer ese instante con exactitud, sino con un determinado error. Para ello, se ha introducido un error aleatorio en la determinación de T , de forma que ahora T ya no es un valor constante, sino una variable aleatoria que sigue una distribución normal de media b y desviación típica bf . En la Fig. 4.31 se muestra que aunque la predicción determinista no sea exacta, el valor de T óptimo se mantiene inalterado. Por otra parte, como cabía esperar, la ganancia de la política CAS óptima disminuye conforme el error en T aumenta.

4.8 Conclusiones

En este capítulo se ha explorado el impacto de incorporar información predictiva en el diseño de políticas CAS óptimas. Así, tras una breve revisión

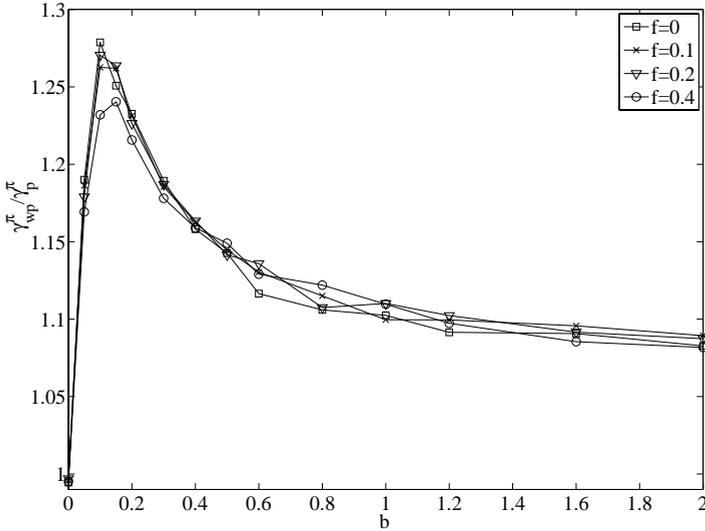


Figura 4.31: Robustez del tiempo de anticipación óptimo.

de la literatura relacionada con la propuesta de esquemas de predicción de movimiento se han expuesto los diferentes tipos de información predictiva considerados. Esta información se ha clasificado en predicción estocástica y determinista, en función de si se conocen o no los instantes en los que van a realizarse los *handovers*, respectivamente. Además, para cada una de ellas la información puede ser relativa a los *handovers* que se prevé van a entrar (predicción de entrada) o a salir (predicción de salida). Posteriormente se ha expuesto cómo se ha empleado la información predictiva en el diseño de políticas CAS hasta la fecha, presentándose luego la perspectiva de optimización basada en RL desarrollada en este trabajo. Asimismo, se presenta el concepto novedoso de post-estado y su aplicación que se ha hecho al CAS.

En un escenario monoservicio y con predicción estocástica de entrada, se han comparado las prestaciones que obtiene RL con la obtenidas al emplear DP, obteniendo resultados muy similares. Este hecho valida el empleo de RL

para el diseño de políticas CAS con información predictiva. Una vez centrados en RL, los resultados muestran que la introducción de post-estados calcula políticas CAS mejores en el problema en cuestión y en relación al empleo de RL convencional. Este resultado se aprecia en dos aspectos. Por una parte las políticas CAS obtenidas tienen un coste inferior y, por otro, los intervalos de confianza obtenidos en las simulaciones son menores. Este hecho se ha verificado en diferentes escenarios, siendo la mayor la mejora conforme aumenta la complejidad del sistema estudiado. Además, el empleo de post-estados permite que la solución RL sea escalable con el número de servicios en la red.

Respecto a qué tipo de información predictiva se muestra más eficaz para el diseño de políticas CAS, se ha demostrado como la información predictiva de salida no aporta ningún conocimiento significativo. Las mayores ganancias se han conseguido al emplear información predictiva de entrada determinista, tanto en escenarios monoservicio como multiservicio. Con este tipo de predicción se ha determinado una forma compacta de representar el espacio de estados cuya cardinalidad disminuye en gran medida respecto a tomar el estado completo del sistema mientras que las prestaciones son similares. Con esta representación del espacio de estados la complejidad del proceso de optimización se hace insensible al número de servicios en la red, ya que depende únicamente de la diferente prioridad que se le quiera dar a unos servicios respecto a otros. Puesto que existe un valor óptimo T para la anticipación con la que conviene estimar los *handovers* entrantes, se ha hecho un estudio de sensibilidad y robustez de T , concluyendo que su valor óptimo no se ve alterado cuando se cambia la carga del sistema, la movilidad de los terminales o la distribución de los tiempos de residencia.

Capítulo 5

Conclusiones

Desde hace poco más de una década, las redes de comunicaciones móviles han producido un enorme impacto social, tal y como se deduce del hecho de que en muchos países, entre los que se encuentra España, existan más teléfonos móviles que habitantes. A pesar de que ya no se esperan grandes incrementos en el número de usuarios, ahora el reto es el de la gestión de una mayor diversidad de servicios que además emplearán una mayor cantidad de recursos. Para hacer compatible este incremento de tráfico con los recursos limitados que ofrece el canal radioeléctrico, existen diversas aproximaciones entre las que destaca la necesidad de realizar una gestión más eficiente de los recursos radio. Más concretamente, esta tesis doctoral se centra en el control de admisión de sesiones en redes celulares. Aunque el control de admisión constituyó una área de investigación destacada por primera vez en la red RDSI de banda ancha, su aplicación a las redes celulares introduce toda una serie de nuevos desafíos debido a la escasez del espectro radioeléctrico, al carácter aleatorio de la propagación y, sobre todo, debido a la movilidad de los terminales.

En la presente tesis doctoral se ha profundizado en dos aspectos diferentes del control de admisión en redes celulares. Por una parte, en el capítulo 3 se proponen y resuelven diversos modelos analíticos con el fin de evaluar el

impacto de los accesos repetitivos que se producen en un sistema cuando el controlador de admisión decide bloquear una petición de acceso al sistema. Debido a las dificultades analíticas que plantean este tipo de modelos, en primer lugar se ha desarrollado una técnica versátil que nos permite resolver este tipo de sistemas. Mediante esta técnica se han resuelto dos modelos que, hasta donde llega el conocimiento del autor, capturan características de las redes celulares que hasta ahora no se habían considerado de forma conjunta por la dificultad que entraña su análisis. El primer modelo considera tanto el reintento de los usuarios como el encolado de las sesiones de *handover* bloqueadas. Las principales conclusiones alcanzadas al analizar el modelo han sido que es suficiente considerar una cola corta para los *handovers* bloqueados así como que no se deben ignorar los remarcados en el proceso de dimensionado de la red. El segundo escenario considerado contempla la posibilidad de que, además de que los usuarios remarquen cuando son bloqueados, la red reintente automáticamente los *handovers* bloqueados mientras permanezcan en el área de solape entre células, tal y como se describe en el estándar GSM. Los operadores móviles pueden configurar este comportamiento para reducir la probabilidad de terminación forzosa, para lo cual se les aporta en esta tesis, a partir de los análisis realizados, una serie de directrices para configurar este mecanismo adecuadamente. Finalmente, se ha propuesto una novedosa técnica de resolución de sistemas con reintentos basada en las ecuaciones de Howard que se ha mostrado muy eficaz y competitiva para calcular los principales parámetros de mérito de este tipo de sistemas.

En el capítulo 4 se explora el impacto que tiene la introducción de información predictiva en el diseño de políticas de control de admisión en redes celulares multiservicio. Este diseño se ha realizado desde una perspectiva de optimización y mediante una técnica de aprendizaje reforzado. Asimismo, se ha aportado el novedoso concepto de los post-estados a este tipo de técnicas, el cual ha mostrado tener una prestaciones superiores respecto al empleo de técnicas de aprendizaje reforzado convencionales. Respecto a la información predictiva analizada, se ha concluido que la información más útil es la estimación de los *handovers* entrantes que van a producirse en un futuro próximo

acotado de forma determinista. Asimismo, y para redes celulares multiservicio, se ha desarrollado una representación del espacio de estados compacta que, junto con el uso de post-estados, permite independizar el número de servicios y la complejidad del problema de optimización. Este hecho puede tomar relevancia en las redes celulares futuras, donde cada vez se prevé que se cursen un mayor número de servicios.

Además de determinadas tareas que complementen el trabajo realizado, se pueden asimismo estimar cuáles pueden constituir las líneas de trabajo futuras de la presente tesis doctoral. Al analizar el desarrollo de las redes celulares actuales y estimando cuál va a ser su evolución futura, parece importante generalizar los resultados de esta tesis doctoral a determinadas situaciones futuras. Por ese motivo, se van a describir nuevos desarrollos tecnológicos que convendría incorporar al marco celular empleado en la presente tesis doctoral. Por una parte, se prevé que cada vez exista un mayor número de servicios que hagan uso del servicio portador *streaming*. Además, ya existen técnicas de codificación de audio y vídeo que permiten modificar de manera adaptativa la tasa del flujo de salida. Por lo tanto, la gestión eficiente del ancho de banda del tráfico *streaming* adaptativo junto con el controlador de admisión puede aportar importantes mejoras de funcionamiento. Otro tipo de tráfico que se estima va a introducirse de forma masiva en las redes móviles es el tráfico elástico de datos, por lo que también puede resultar muy interesante el considerar su gestión eficiente en conjunto con el tráfico conversacional y *streaming*. Por otra parte, la integración de diferentes tecnologías de acceso en el mismo terminal se está convirtiendo en una realidad y es que cada vez coexisten un mayor número de tecnologías de acceso inalámbricas como las actuales GSM, 3G y WiFi, la esperada e inminente popularización de WiMAX y la futura MobileFi. El objetivo es realizar una gestión eficiente de esta heterogeneidad de modo que se siga el paradigma *always best connected*.

Apéndices

Apéndice A

Abreviaturas y acrónimos

1G 2G 3G 4G	Generaciones de telefonía móvil celular
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
AM	Modulación en amplitud
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
ANN	<i>Artificial Neural Networks</i>
AoA	<i>Angle of Arrival</i> , ángulo de llegada
AP	Método de Artalejo y Pozo propuesto en [AP02] (capítulo 3) o Agente Predictor (capítulo 4)
CAS	Control de Admisión de Sesiones
CDG	<i>CDMA Development Group</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CHT	<i>Channel Holding Time</i> , tiempo de ocupación de los recursos
CRT	<i>Cell Residence Time</i> , tiempo de residencia en la célula
CS	<i>Complete Sharing</i>
CSD	<i>Circuit Switched Data</i>
CTMC	<i>Continuous Time Markov Chain</i>
CV	Coefficiente de Variación
DCA	<i>Dynamic Channel Allocation</i>
DP	<i>Dynamic Programming</i> , programación dinámica

DPS	<i>Discriminatory Processor Sharing</i>
EDGE	<i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
E-OTD	<i>Enhanced Observed Time Difference</i>
ESA	<i>Agencia Espacial Europea</i>
E-TACS	<i>Extended Total Access Communications System</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FCA	<i>Fixed Channel Allocation</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FGC	<i>Fractional Guard Channel</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
FM	Método propuesto en [DBGGMBCG05] (capítulo 3) o modulación en frecuencia (capítulo 1)
GC	<i>Guard Channel</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	<i>Groupe Spécial Mobile / Global System for Mobile Communications</i>
HCA	<i>Hybrid Channel Allocation</i>
HSCSD	<i>High-Speed Circuit Switched Data</i>
IMT-2000	<i>International Mobile Telecommunications</i>
IMTS	<i>Improved Mobile Telephone Service</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IS-95	<i>Interim Standard 95</i>
LLR	<i>Local Linear Regression</i>
MAP	<i>Markovian Arrival Process</i>
MDP	Proceso de Decisión de Markov
MMS	<i>Multimedia Messaging Service</i>
MSAS	<i>Multi-functional Satellite Augmentation System</i>
MTS	<i>Mobile Telephone Service</i>
NMT	<i>Nordic Mobile Telephony</i>
NR	Método de Neuts y Rao propuesto en [NR90]
OTDOA	<i>Observed Time Difference of Arrival</i>

P2P	<i>Peer to peer</i>
PAMR	<i>Public Access Mobile Radio</i>
PDC	<i>Personal Digital Cellular</i>
PH	<i>Phase type</i>
QBD	<i>Quasi Birth and Death Process</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RDSI-BA	<i>Red Digital de Servicios Integrados de Banda Ancha</i>
RL	<i>Reinforcement Learning, aprendizaje reforzado</i>
RRM	<i>Radio Resource Management, gestión de recursos radio</i>
RSS	<i>Received Signal Strength, potencia de la señal recibida</i>
SMART	<i>Semi-Markov Average Reward Technique</i>
SMDP	<i>Proceso de Decisión Semimarkoviano</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
TD	<i>Temporal Difference learning</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UIT	<i>Unión Internacional de Telecomunicaciones</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications Service</i>
UWC-136HS	<i>Universal Wireless Communications-136 High Speed</i>
UWCC	<i>Universal Wireless Communications Consortium</i>
VE	<i>Value Extrapolation</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VoD	<i>Video on Demand, vídeo bajo demanda</i>
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i>
WCDMA	<i>Wideband CDMA</i>

Apéndice B

Desarrollo de expresiones y matrices

B.1 Red celular con remarcados y encolado de *handovers*

B.1.1 Cálculo del valor de M y p

Para calcular el valor de los parámetros M y p del sistema celular que permite el encolado de *handovers* bloqueados mientras estos se encuentren en el área de solape entre células se parte de los cortes verticales del diagrama de transiciones descrito en la Fig. 3.6:

- 1^{er} corte vertical:

$$\begin{aligned} \lambda_n(1-f)\pi(L,0) + \lambda_n \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k,0) &= \mu_{red} \sum_{k=0}^{L-1} \pi(k,1) + \\ &+ (1-f)\mu_{red}P_{in}\pi(L,1) + f\mu_{red}\pi(L,1) + \mu_{red}P_{in} \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k,1). \end{aligned}$$

- 2º corte vertical:

$$\begin{aligned} \lambda_n(1-f)\pi(L,1) + \lambda_n \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k,1) &= 2\mu_{red} \sum_{k=0}^{L-1} \pi(k,2) + \\ &+ (1-f)2\mu_{red}P_{in}\pi(L,2) + f2\mu_{red}\pi(L,2) + 2\mu_{red}P_{in} \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k,2). \end{aligned}$$

- ...

- Último corte vertical:

$$\begin{aligned} \lambda_n(1-f)\pi(L,Q-1) + \lambda_n \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k,Q-1) &= \alpha \sum_{k=0}^{L-1} \pi(k,Q) + \\ &+ (1-f)\alpha P_{in}\pi(L,Q) + f\alpha\pi(L,Q) + \alpha P_{in} \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k,Q). \end{aligned}$$

Sumando todos los cortes verticales tenemos:

$$\begin{aligned} &\lambda_n(1-f) \sum_{m=0}^{Q-1} \pi(L,m) + \lambda_n \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \sum_{m=0}^{Q-1} \pi(k,m) = \\ = &\mu_{red} \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{Q-1} m\pi(k,m) + (1-f)\mu_{red}P_{in} \sum_{m=0}^{Q-1} m\pi(L,m) + f\mu_{red} \sum_{m=0}^{Q-1} m\pi(L,m) + \\ &+ \mu_{red}P_{in} \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \sum_{m=0}^{Q-1} m\pi(k,m) + \alpha \sum_{k=0}^{L-1} \pi(k,Q) + (1-f)\alpha P_{in}\pi(L,Q) + \\ &+ f\alpha\pi(L,Q) + \alpha P_{in} \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k,Q). \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que $(R_{1,f})_n = (R_{r,s})_n + (R_{ab})_n$, se puede escribir:

$$\begin{aligned} \lambda_n(1-f)\pi(L,Q) + \lambda_n \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k,Q) &= pM\mu_{red} \sum_{k=0}^{L-1} \pi(k,Q) + \\ &+ p(1-f)M\mu_{red}P_{in}\pi(L,Q) + pM\mu_{red}f\pi(L,Q) + pM\mu_{red}P_{in} \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k,Q). \end{aligned}$$

Ordenando el último corte:

$$\begin{aligned}
 & \lambda_n(1-f)\pi(L, Q-1) + \lambda_n \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k, Q-1) - M\mu_{red} \sum_{k=0}^{L-1} \pi(k, Q) - \\
 & -M\mu_{red}(1-f)P_{in}\pi(L, Q) - M\mu_{red}f\pi(L, Q) - M\mu_{red}P_{in} \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k, Q) = \\
 & = -pM\mu_{red} \sum_{k=0}^{L-1} \pi(k, Q) - pM\mu_{red}(1-f)P_{in}\pi(L, Q) - \\
 & -pM\mu_{red}f\pi(L, Q) - pM\mu_{red}P_{in} \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k, Q).
 \end{aligned}$$

De las dos últimas ecuaciones se obtiene:

$$\begin{aligned}
 & \lambda_n(1-f)\pi(L, Q-1) + \lambda_n \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k, Q-1) - M\mu_{red} \sum_{k=0}^{L-1} \pi(k, Q) - \\
 & -M\mu_{red}(1-f)P_{in}\pi(L, Q) - M\mu_{red}f\pi(L, Q) - M\mu_{red}P_{in} \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k, Q) = \\
 & = -\lambda_n(1-f)\pi(L, Q) - \lambda_n \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k, Q),
 \end{aligned}$$

de donde se puede obtener

$$\begin{aligned}
 p &= \frac{(1-f)\pi(L, Q) + \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k, Q)}{(1-f)[\pi(L, Q) + \pi(L, Q-1)] + \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} [\pi(k, Q) + \pi(k, Q-1)]}, \\
 M &= \frac{\lambda_n[(1-f)[\pi(L, Q) + \pi(L, Q-1)] + \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} [\pi(k, Q) + \pi(k, Q-1)]}{\mu_{red}[\sum_{k=0}^{L-1} \pi(k, Q) + (1-f)P_{in}\pi(L, Q) + f\pi(L, Q) + P_{in} \sum_{k=L+1}^{C+\Theta} \pi(k, Q)]}.
 \end{aligned}$$

B.1.2 Estructura del generador infinitesimal

Al tener el sistema propuesto únicamente transiciones dentro del mismo nivel y entre niveles adyacentes, la estructura de \mathbf{Q} es tridiagonal a bloques de tamaño $(Q+1) \times (Q+1)$ del siguiente modo

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0^0 & \mathbf{v}_0^+ & \dots & 0 & 0 \\ \mathbf{v}_1^- & \mathbf{v}_1^0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{v}_2^- & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{v}_{C+\Theta-2}^+ & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{v}_{C+\Theta-1}^0 & \mathbf{v}_{C+\Theta-1}^+ \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{v}_{C+\Theta}^- & \mathbf{v}_{C+\Theta}^0 \end{bmatrix}.$$

Las matrices \mathbf{v}_k^+ definen las transiciones $(k, m) \rightarrow (k + 1, s)$ y, siendo \mathbf{I} la matriz identidad de tamaño $(Q + 1) \times (Q + 1)$, toman el siguiente valor:

$$\mathbf{v}_k^+ = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \mu_{red} & \lambda & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu_{red} & \lambda & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \alpha & \lambda + \beta \end{bmatrix}, \text{ para } k \in [0, L - 1],$$

$$\mathbf{v}_L^+ = \begin{bmatrix} \lambda_h + f\lambda_n & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ f\mu_{red} & \lambda_h + f\lambda_n & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 2f\mu_{red} & \lambda_h + f\lambda_n & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda_h + f\lambda_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \alpha f & \lambda_h + f(\beta + \lambda_n) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{v}_k^+ = \lambda_h \mathbf{I}, \text{ para } k \in [L + 1, C + \Theta].$$

Por otra parte, las matrices \mathbf{v}_k^0 definen las transiciones $(k, m) \rightarrow (k, s)$, tomando el siguiente valor:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{v}_k^0 &= * \mathbf{I}, \text{ para } k \in [0, L-1], \\
 \mathbf{v}_L^0 &= \begin{bmatrix} * & (1-f)\lambda_n & 0 & \dots & 0 & 0 \\ (1-f)\mu_{red}P_{in} & * & (1-f)\lambda_n & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 2(1-f)\mu_{red}P_{in} & * & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & * & (1-f)\lambda_n \\ 0 & 0 & 0 & \dots & (1-f)\alpha P_{in} & * \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{v}_k^0 &= \begin{bmatrix} * & \lambda_n & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \mu_{red}P_{in} & * & \lambda_n & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu_{red}P_{in} & * & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & * & \lambda_n \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \alpha P_{in} & * \end{bmatrix}, \text{ para } k \in [L+1, C+\Theta].
 \end{aligned}$$

Nótese que los asteriscos (*) representan los valores que hacen que la suma de cada fila de \mathbf{Q} sea igual a 0.

Finalmente, las matrices \mathbf{v}_k^- representan las transiciones $(k, m) \rightarrow (k-1, s)$, siendo:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{v}_k^- &= k\mu \mathbf{I}, \text{ para } k \in [1, C], \\
 \mathbf{v}_k^- &= [C\mu + (k-C)\gamma] \mathbf{I}, \text{ para } k \in [C+1, C+\Theta].
 \end{aligned}$$

B.2 Red celular con remarcados y reintentos automáticos

B.2.1 Estructura del generador infinitesimal

Para un caso simple en el que $C = 4$, $Q_n = Q_h = 3 = Q_x$ y $L = 2$ son¹:

$$\mathbf{v}_0^+ = \mathbf{v}_1^+ = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_0^+ & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mu_{red}\mathbf{I} & \mathbf{D}_0^+ & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 2\mu_{red}\mathbf{I} & \mathbf{D}_0^+ & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \alpha_n\mathbf{I} & \mathbf{D}_0^+ + \beta_n\mathbf{I} \end{bmatrix},$$

donde

$$\mathbf{D}_0^+ = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{ret} & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu_{ret} & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_h & \lambda + \beta_h \end{bmatrix},$$

¹Por cuestiones de claridad, los caracteres en negrilla en las matrices representan un bloque completo. Por ejemplo, $\mathbf{0}$ representa un bloque con todos los valores iguales a 0 e \mathbf{I} es la matriz identidad.

$$\mathbf{v}_2^+ = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_2^+ & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ f\mu_{red}\mathbf{I} & \mathbf{D}_2^+ & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 2f\mu_{red}\mathbf{I} & \mathbf{D}_2^+ & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & f\alpha_n\mathbf{I} & \mathbf{D}_2^+ + f\beta_n\mathbf{I} \end{bmatrix},$$

donde

$$\mathbf{D}_2^+ = \begin{bmatrix} \lambda_h + f\lambda_n & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{ret} & \lambda_h + f\lambda_n & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu_{ret} & \lambda_h + f\lambda_n & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_h & \lambda_h + f\lambda_n + \beta_h \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{v}_3^+ = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_3^+ & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D}_3^+ & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{D}_3^+ & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{D}_3^+ \end{bmatrix},$$

donde

$$\mathbf{D}_3^+ = \begin{bmatrix} \lambda_h & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{ret} & \lambda_h & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu_{ret} & \lambda_h & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_h & \lambda_h + \beta_h \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{v}_k^- = k\mu\mathbf{I}, \text{ para } 1 \leq k \leq C,$$

$$\mathbf{v}_i^0 = *\mathbf{I}, \text{ para } 0 \leq i < L,$$

$$\mathbf{v}_2^0 = \begin{bmatrix} *\mathbf{I} & \lambda_n(1-P_{in}^1)(1-f)\mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mu_{red}(1-f)P_{in}\mathbf{I} & *\mathbf{I} & \lambda_n(1-P_{in}^1)(1-f)\mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 2\mu_{red}(1-f)P_{in}\mathbf{I} & *\mathbf{I} & \lambda_n(1-P_{in}^1)(1-f)\mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \alpha_n(1-f)P_{in}\mathbf{I} & *\mathbf{I} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{v}_3^0 = \begin{bmatrix} * \mathbf{I} & \lambda_n(1 - P_{in}^1) \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mu_{red} P_{in} \mathbf{I} & * \mathbf{I} & \lambda_n(1 - P_{in}^1) \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 2\mu_{red} P_{in} \mathbf{I} & * \mathbf{I} & \lambda_n(1 - P_{in}^1) \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \alpha_n P_{in} \mathbf{I} & * \mathbf{I} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{v}_4^0 = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_4^0 & \lambda_n(1 - P_{in}^1) \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mu_{red} P_{in} \mathbf{I} & \mathbf{D}_4^0 & \lambda_n(1 - P_{in}^1) \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 2\mu_{red} P_{in} \mathbf{I} & \mathbf{D}_4^0 & \lambda_n(1 - P_{in}^1) \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \alpha_n P_{in} \mathbf{I} & \mathbf{D}_4^0 \end{bmatrix},$$

donde

$$\mathbf{D}_4^0 = \begin{bmatrix} * & \lambda_h(1 - P_{ih}^1) & 0 & 0 \\ \mu_{ret} & * & \lambda_h(1 - P_{ih}^1) & 0 \\ 0 & 2\mu_{ret} & * & \lambda_h(1 - P_{ih}^1) \\ 0 & 0 & \alpha_h & * \end{bmatrix}.$$

Los asteriscos (*) que aparecen en \mathbf{v}^0 son los valores negativos que hacen que la suma de cada fila de \mathbf{Q} sea igual a cero.

B.2.2 Valor de las tasas para el cálculo de los parámetros de prestaciones

Con el mismo significado que en los modelos desarrollados anteriormente, se podrán definir R_o como la tasa media ofrecida, $R_{1,s}$ como la tasa de primeros intentos exitosos y $R_{1,f}$ como la tasa primeros intentos fallidos. También se denota como R_r la tasa media de reintentos, $R_{r,s}$ la tasa media de reintentos que tienen éxito en su acceso al sistema y $R_{r,f}$ la tasa media de reintentos fallidos. Finalmente, R_{ab} representa la tasa media de abandonos. Como hay dos órbitas de reintentos, se pueden separar todas las tasas anteriores en dos: una con el subíndice n que representa los sesiones nuevas y remarcados y la segunda, con subíndice h que representa los *handovers* y sus reintentos automáticos asociados.

Para los *handovers* se tiene:

$$\begin{aligned}
 (R_o)_h &= \lambda_h \sum_{k=0}^C \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, m, s), \\
 (R_{1,s})_h &= \lambda_h \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, m, s), \\
 (R_{1,f})_h &= \lambda_h \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(C, m, s), \\
 (R_r)_h &= \mu_{ret} \sum_{k=0}^C \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h-1} s\pi(k, m, s) + M_h \mu_{ret} \sum_{k=0}^C \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(k, m, Q_h), \\
 (R_{r,s})_h &= \mu_{ret} \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h-1} s\pi(k, m, s) + M_h \mu_{ret} \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(k, m, Q_h), \\
 (R_{r,f})_h &= \mu_{ret} \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h-1} s\pi(C, m, s) + M_h \mu_{ret} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h), \\
 (R_{ab})_h &= P_{ih} (R_{r,f})_h + P_{ih}^1 (R_{1,f})_h.
 \end{aligned}$$

Para sesiones nuevas se tiene:

$$\begin{aligned}
 (R_o)_n &= \lambda_n \sum_{k=0}^C \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, m, s), \\
 (R_{1,s})_n &= \lambda_n \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, m, s) + f \lambda_n \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, m, s), \\
 (R_{1,f})_n &= (1-f) \lambda_n \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, m, s) + \lambda_n \sum_{k=L+1}^C \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, m, s), \\
 (R_r)_n &= \mu_{red} \sum_{k=0}^C \sum_{m=0}^{Q_n-1} \sum_{s=0}^{Q_h} m \pi(k, m, s) + M_n \mu_{red} \sum_{k=0}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s), \\
 (R_{r,s})_n &= \mu_{red} \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{Q_n-1} \sum_{s=0}^{Q_h} m \pi(k, m, s) + M_n \mu_{red} \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) + \\
 &\quad + f \mu_{red} \sum_{m=0}^{Q_n-1} \sum_{s=0}^{Q_h} m \pi(L, m, s) + f M_n \mu_{red} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s), \\
 (R_{r,f})_n &= \mu_{red} \sum_{k=L+1}^C \sum_{m=0}^{Q_n-1} \sum_{s=0}^{Q_h} m \pi(k, m, s) + M_n \mu_{red} \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) + \\
 &\quad + (1-f) \mu_{red} \sum_{m=0}^{Q_n-1} \sum_{s=0}^{Q_h} m \pi(L, m, s) + (1-f) M_n \mu_{red} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s), \\
 (R_{ab})_n &= P_{in} (R_{r,f})_n + P_{in}^1 (R_{1,f})_n.
 \end{aligned}$$

B.2.3 Cálculo del valor de M y p

A partir de los cortes verticales del diagrama de transiciones se pueden calcular los parámetros de la órbita de remarcados, M_n and p_n .

- 1^{er} corte vertical:

$$\begin{aligned}
 & \mu_{red} \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, 2, s) + f \mu_{red} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, 2, s) + \\
 & + \mu_{red}(1-f)P_{in} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, 2, s) + \mu_{red}P_{in} \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, 2, s) = \\
 & = \lambda_n(1-f)(1-P_{in}^1) \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, 0, s) + \lambda_n(1-P_{in}^1) \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, 0, s).
 \end{aligned}$$

- 2º corte vertical:

$$\begin{aligned}
 & 2\mu_{red} \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, 1, s) + 2f\mu_{red} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, 1, s) + \\
 & + 2\mu_{red}(1-f)P_{in} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, 1, s) + 2\mu_{red}P_{in} \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, 1, s) = \\
 & = \lambda_n(1-f)(1-P_{in}^1) \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, 1, s) + \lambda_n(1-P_{in}^1) \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, 1, s).
 \end{aligned}$$

- ...

- Último corte vertical:

$$\begin{aligned}
 & \alpha_n \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) + f\alpha_n \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) + \alpha_n(1-f)P_{in} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) + \\
 & + \alpha_n P_{in} \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) = \lambda_n(1-f)(1-P_{in}^1) \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n - 1, s) + \\
 & + \lambda_n(1-P_{in}^1) \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n - 1, s).
 \end{aligned}$$

Sumando todos los cortes verticales:

$$\begin{aligned}
 & \mu_{red} \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{Q_n-1} \sum_{s=0}^{Q_h} m \pi(k, m, s) + f \mu_{red} \sum_{m=0}^{Q_n-1} \sum_{s=0}^{Q_h} m \pi(L, m, s) + \mu_{red}(1-f) P_{in} \sum_{m=0}^{Q_n-1} \sum_{s=0}^{Q_h} m \pi(L, m, s) + \\
 & + \mu_{red} P_{in} \sum_{k=L+1}^C \sum_{m=0}^{Q_n-1} \sum_{s=0}^{Q_h} m \pi(k, m, s) + \alpha_n \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) + f \alpha_n \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) + \\
 & + \alpha_n(1-f) P_{in} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) + \alpha_n P_{in} \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) = \\
 & = \lambda_n(1-f)(1 - P_{in}^1) \sum_{m=0}^{Q_n-1} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, m, s) + \lambda_n(1 - P_{in}^1) \sum_{k=L+1}^C \sum_{m=0}^{Q_n-1} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, m, s).
 \end{aligned}$$

Reordenando la última ecuación y teniendo en cuenta que

$$(R_{1,f})_n(1 - P_{in}^1) = (R_{r,s})_n + P_{in}(R_{r,f})_n,$$

se obtiene

$$\begin{aligned}
 & \lambda_n(1-f)(1 - P_{in}^1) \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) + \lambda_n(1 - P_{in}^1) \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) = \\
 & = p_n M_n \mu_{red} \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) + p_n f M_n \mu_{red} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) + \\
 & + p_n M_n \mu_{red}(1-f) P_{in} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) + p_n M_n \mu_{red} P_{in} \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s). \quad (B.1)
 \end{aligned}$$

Del último corte vertical:

$$\begin{aligned}
 \lambda_n(1-f)(1-P_{in}^1) \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n - 1, s) + \lambda_n(1-P_{in}^1) \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n - 1, s) = \\
 = M_n \mu_{red} \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) + f M_n \mu_{red} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) + \\
 + M_n \mu_{red} (1-f) P_{in} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) + M_n \mu_{red} P_{in} \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) - \\
 - p_n M_n \mu_{red} \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) - p_n f M_n \mu_{red} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) - \\
 - p_n M_n \mu_{red} (1-f) P_{in} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) - p_n M_n \mu_{red} P_{in} \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s).
 \end{aligned} \tag{B.2}$$

Sumando las ecuaciones (B.1) y (B.2) se obtiene:

$$\begin{aligned}
 \lambda_n(1-P_{in}^1) \left[\sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} [\pi(k, Q_n - 1, s) + \pi(k, Q_n, s)] + \right. \\
 \left. + (1-f) \sum_{s=0}^{Q_h} [\pi(L, Q_n - 1, s) + \pi(L, Q_n, s)] \right] = \\
 = M_n \mu_{red} \left[\sum_{k=0}^{L-1} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) + f \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) + (1-f) P_{in} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) + \right. \\
 \left. + P_{in} \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) \right].
 \end{aligned}$$

Finalmente, se obtienen los valores de p_n y M_n :

$$p_n = \frac{\zeta_1}{\zeta_2}, \quad M_n = \frac{\lambda_n(1-P_{in}^1)\zeta_2}{\mu_{red}\zeta_3},$$

donde

$$\zeta_1 = \sum_{k=L+1}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) + (1-f) \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s),$$

$$\zeta_2 = \sum_{k=L+1s=0}^C \sum_{s=0}^{Q_h} [\pi(k, Q_n - 1, s) + \pi(k, Q_n, s)] + (1-f) \sum_{s=0}^{Q_h} [\pi(L, Q_n - 1, s) + \pi(L, Q_n, s)],$$

$$\zeta_3 = \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s) + f \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) + (1-f) P_{ih} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(L, Q_n, s) + P_{ih} \sum_{k=L+1s=0}^C \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(k, Q_n, s).$$

Usando los cortes horizontales del diagrama de transiciones se pueden calcular los parámetros introducidos por FM para la órbita de reintentos automáticos, M_h y p_h .

- 1^{er} corte horizontal:

$$\mu_{ret} \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(k, m, 1) + \mu_{ret} P_{ih} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, 1) = \lambda_h (1 - P_{ih}^1) \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, 0).$$

- 2^o corte horizontal:

$$2\mu_{ret} \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(k, m, 2) + 2\mu_{ret} P_{ih} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, 2) = \lambda_h (1 - P_{ih}^1) \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, 1).$$

- ...

- Último corte horizontal:

$$\alpha_h \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(k, m, Q_h) + \alpha_h P_{ih} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h) = \lambda_h (1 - P_{ih}^1) \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h - 1).$$

La suma de estos cortes es

$$\lambda_h (1 - P_{ih}^1) \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h-1} \pi(C, m, s) = \mu_{ret} \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h-1} s \pi(k, m, s) + \mu_{ret} P_{ih} \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h-1} s \pi(C, m, s) +$$

$$+ M_h \mu_{ret} (1 - p_h) \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(k, m, Q_h) + M_h \mu_{ret} (1 - p_h) P_{ih} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h),$$

y reordenando la última expresión:

$$\begin{aligned}
 & \lambda_h(1-P_{ih}^1) \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h} \pi(C, m, s) - \lambda_h(1-P_{ih}^1) \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h) = \\
 & = \mu_{ret} \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h-1} s\pi(k, m, s) + M_h \mu_{ret} \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h) - \\
 & - p_h M_h \mu_{ret} \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(k, m, Q_h) + \mu_{ret} P_{ih} \sum_{m=0}^{Q_n} \sum_{s=0}^{Q_h-1} s\pi(C, m, s) + \\
 & + M_h \mu_{ret} P_{ih} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h) - p_h M_h P_{ih} \mu_{ret} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h).
 \end{aligned}$$

Considerando $(R_{1,f})_h(1 - P_{ih}^1) = (R_{r,s})_h + P_{ih}(R_{r,f})_h$, se obtiene:

$$\begin{aligned}
 & \lambda_h(1-P_{ih}^1) \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h) = \\
 & = p_h M_h \mu_{ret} \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(k, m, Q_h) + p_h M_h P_{ih} \mu_{ret} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h). \quad (B.3)
 \end{aligned}$$

Del último corte horizontal:

$$\begin{aligned}
 & \lambda_h(1-P_{ih}^1) \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h - 1) = \mu_{ret} \left[M_h \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(k, m, Q_h) - \right. \\
 & \left. - p_h M_h \sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(k, m, Q_h) + M_h P_{ih} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h) - p_h M_h P_{ih} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h) \right]. \quad (B.4)
 \end{aligned}$$

Sumando las ecuaciones (B.3) y (B.4):

$$\begin{aligned}
 & \lambda_h(1-P_{ih}^1) \left[\sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h) + \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h - 1) \right] = \\
 & = M_h \mu_{ret} \left[\sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(k, m, Q_h) + P_{ih} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h) \right].
 \end{aligned}$$

Finalmente, se obtienen los valores de p_h y M_h :

$$p_h = \frac{\sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h)}{\sum_{m=0}^{Q_n} [\pi(C, m, Q_h) + \pi(C, m, Q_h - 1)]}, \quad (\text{B.5})$$

$$M_h = \frac{\lambda_h(1 - P_{ih}^1) \left[\sum_{m=0}^{Q_n} [\pi(C, m, Q_h) + \pi(C, m, Q_h - 1)] \right]}{\mu_{ret} \left[\sum_{k=0}^{C-1} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(k, m, Q_h) + P_{ih} \sum_{m=0}^{Q_n} \pi(C, m, Q_h) \right]}. \quad (\text{B.6})$$

B.3 Valores de las matrices para el método VE

Los bloques de \mathbf{T}' son:

$$\mathbf{A}_0^k = (k + 1)\mu\mathbf{I}, \text{ para } 0 \leq k \leq (C - 1),$$

donde \mathbf{I} es la matriz identidad.

$$\mathbf{A}_2^k = \begin{bmatrix} \lambda & \mu_{ret} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 2\mu_{ret} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda & Q\mu_{ret} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \lambda \end{bmatrix}, \text{ para } 1 \leq k \leq C.$$

$$\mathbf{A}_1^k = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha - \mu_{ret} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \alpha - 2\mu_{ret} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \alpha - Q\mu_{ret} \end{bmatrix},$$

para $0 \leq k \leq (C - 1)$ y con $\alpha = -\lambda - k\mu$.

Como ejemplo, el valor de \mathbf{A}_1^C para la extrapolación lineal y cuadrática son, respectivamente:

$$\mathbf{A}_1^C = \begin{bmatrix} \alpha & P_i\mu_{ret} & \dots & 0 & 0 \\ \lambda & \alpha - P_i\mu_{ret} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \alpha - (Q-1)P_i\mu_{ret} & QP_i\mu_{ret} - \lambda \\ 0 & 0 & \dots & \lambda & \lambda - C\mu - QP_i\mu_{ret} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_1^C = \begin{bmatrix} \alpha & P_i\mu_{ret} & \dots & 0 & 0 \\ \lambda & \alpha - P_i\mu_{ret} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & (Q-1)P_i\mu_{ret} & \lambda \\ 0 & 0 & \dots & \alpha - (Q-1)P_i\mu_{ret} & QP_i\mu_{ret} - 3\lambda \\ 0 & 0 & \dots & \lambda & 2\lambda - C\mu - QP_i\mu_{ret} \end{bmatrix},$$

donde $\alpha = -\lambda - C\mu$.

Apéndice C

Publicaciones

C.1 Relacionadas con la tesis

C.1.1 Capítulo de libro

1. Jorge Martínez-Bauset, Vicent Pla, David García, M^aJosé Doménech, José Manuel Giménez-Guzmán.

Título del libro: **Advances in Wireless Networks: Performance Modelling, Analysis and Enhancement.**

Título del capítulo: **Designing admission control policies to minimize blocking/forced-termination.**

Volume 8 in Wireless Networks and Mobile Computing (Yi Pan - Editor). ISBN: 1-60021-713-3. Nova Science Publishers.

C.1.2 Revistas incluidas en *Journal Citation Reports*

1. M^aJosé Doménech-Benlloch, José Manuel Giménez-Guzmán, Jorge Martínez-Bauset, Vicente Casares-Giner.

Efficient and accurate methodology for solving multiserver retrial

- systems**, IEE Electronic Letters. Vol. 41, no. 17, pp. 967-969. Agosto 2005. ISSN 0013-5194.
2. Vicent Pla, José Manuel Giménez-Guzmán, Jorge Martínez-Bauset, Vicente Casares-Giner.
Optimal Bandwidth Reservation in Multiservice Mobile Cellular Networks with Movement Prediction, IEICE Transactions on Communications Vol. E88-B, no. 10, pp. 4138-4141. Octubre 2005. ISSN 0916-8516.
3. José Manuel Giménez-Guzmán, Jorge Martínez-Bauset, Vicent Pla.
A Reinforcement Learning Approach for Admission Control in Mobile Multimedia Networks with Predictive Information, IEICE Transactions on Communications. Vol. E90-B, no.7, pp. 1663-1673. Julio 2007. ISSN 0916-8516.
4. M^aJose Doménech-Benlloch, Jose Manuel Giménez-Guzmán, Vicent Pla, Jorge Martínez-Bauset, Vicente Casares-Giner.
Generalized Truncated Methods for an Efficient Solution of Retrial Systems, Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2008, Article ID 183089, pp. 1-15. 2008. ISSN: 1024-123X. e-ISSN: 1563-5147.
5. José Manuel Giménez-Guzmán, M^aJosé Doménech-Benlloch, Vicent Pla, Vicente Casares-Giner, Jorge Martinez-Bauset.
Guaranteeing Seamless Mobility with User Redials and Automatic Handover Retrials, Journal of Universal Computer Science (in press). ISSN: 0948-695x. e-ISSN: 0948-6968.
6. José Manuel Giménez-Guzmán, M^aJosé Doménech-Benlloch, Vicent Pla, Vicente Casares-Giner, Jorge Martínez-Bauset.

Value Extrapolation Technique to Solve Retrial Queues: a Comparative Perspective, ETRI Journal, Vol.30, no.3, pp.492-494. Junio 2008. ISSN 1225-6463.

7. Vicent Pla, José Manuel Giménez-Guzmán, Jorge Martínez-Bauset, Vicente Casares-Giner.

Optimal Admission Control Using Handover Prediction in Mobile Cellular Networks, Wireless Personal Communications (aceptado). ISSN: 0929-6212. e-ISSN: 1572-834X.

8. Jorge Martínez-Bauset, José Manuel Giménez-Guzmán, Vicent Pla.
Optimal Admission Control in Multimedia Mobile Networks with Handover Prediction, IEEE Wireless Communications Magazine (aceptado). ISSN: 1536-1284.

C.1.3 Otras revistas

1. José Manuel Giménez-Guzmán, Jorge Martínez-Bauset, Vicent Pla.
Performance Bounds for Mobile Cellular Networks with Handover Prediction, Management of Integrated Multimedia Services, Lecture Notes in Computer Science (LCNS), Springer. Vol. 3754, pp. 35-46. Octubre 2005. ISSN 0302-9743.
2. José Manuel Giménez-Guzmán, Jorge Martínez-Bauset, Vicent Pla.
An Afterstates Reinforcement Learning Approach to Optimize Admission Control in Mobile Cellular Networks, Wireless Systems and Network Architectures in Next Generation Internet, Lecture Notes in Computer Science (LCNS), Springer. Vol. 3883, pp. 115-129. Febrero 2006. ISSN 0302-9743.

3. M^aJosé Doménech-Benlloch, José Manuel Giménez-Guzmán, Jorge Martínez Bauset, Vicente Casares-Giner.
A Low Computation Cost Algorithm to Solve Cellular Systems with Retrials Accurately, Wireless Systems and Network Architectures in Next Generation Internet, Lecture Notes in Computer Science (LCNS), Springer. Vol. 3883, pp. 103-114. Febrero 2006. ISSN 0302-9743.

4. José Manuel Giménez-Guzmán, Jorge Martínez-Bauset, Vicent Pla, Vicente Casares-Giner.
Control de admisión óptimo en redes móviles celulares con predicción de movimiento, IEEE Latin America Transactions. Vol. 4, Issue 6. Diciembre 2006. ISSN 1548-0992.
A partir de la versión presentada en:
V Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL 2005). Vigo. Septiembre 2005. ISBN 84-8408-346-2.

5. José Manuel Giménez-Guzmán, M^aJosé Doménech-Benlloch, Vicent Pla, Vicente Casares-Giner, Jorge Martínez-Bauset.
Analysis of a Cellular Network with User Redials and Automatic Network Retrials, The 7th International Conference on Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking (NEW2AN 2007), Lecture Notes in Computer Science (LCNS), Springer, vol. 4712, pp. 210–222, ISSN 0302-9743. Septiembre 2007.

6. José Manuel Giménez-Guzmán, M^aJosé Doménech-Benlloch, Vicent Pla, Vicente Casares-Giner, Jorge Martínez-Bauset.
Efecto de los remarcados y reintentos automáticos en redes celulares, IEEE Latin America Transactions. Vol. 5, no. 6, pp. 433-440. Octubre 2007. ISSN 1548-0992.
Escogido a partir de la versión presentada en:
VI Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL 2007). Málaga. Septiembre

2007.

C.1.4 Congreso

Internacional

1. Vicent Pla, José Manuel Giménez-Guzmán, Jorge Martínez-Bauset, Vicente Casares-Giner.
Optimal Admission Control Using Handover Prediction in Mobile Cellular Networks, In Proceedings HET-NETs '04 - Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks. Ilkley, West Yorkshire, Reino Unido. Julio 2004. ISBN 0-9540151-6-9.
2. José Manuel Giménez-Guzmán, M^a José Doménech-Benlloch, Jorge Martínez-Bauset, Vicent Pla, Vicente Casares-Giner.
Analysis of a Handover Procedure with Queueing, Retrials and Impatient Customers, In Proceedings HET-NETs '05 - Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks. Ilkley, West Yorkshire, Reino Unido. Julio 2005. ISBN 0-9550624-0-3.
3. José Manuel Giménez-Guzmán, Jorge Martínez-Bauset, Vicent Pla.
Optimal Admission Control in Multimedia Mobile Networks with Movement Prediction: A Sensitivity Analysis, 3rd EURO-NGI Conference on Next Generation Internet Networks Design and Engineering for Heterogeneity, 21-23 Mayo 2007. Trondheim, Noruega. ISBN 1-4244-0856-3.
4. José Manuel Giménez-Guzmán, M^a José Doménech-Benlloch, Vicent Pla, Vicente Casares-Giner, Jorge Martínez-Bauset.
Efficient and Accurate Solution of Multiserver Retrieval Systems with

User Impatience Through the Value Extrapolation Technique, 2008 International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS), 16-18 Junio 2008, Edimburgo, Reino Unido.

Nacional

1. M^a José Doménech-Benlloch, José Manuel Giménez-Guzmán, Vicente Casares-Giner.
Modelos Markovianos para la resolución de sistemas con reintentos. Evaluación de diferentes metodologías, IV Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL 2003). Gran Canaria, España. Septiembre 2003. ISBN 84-96131-38-6.

C.2 Otras publicaciones

C.2.1 Revista

1. José Manuel Giménez-Guzmán, Jorge Martínez-Bauset.
Análisis de Prestaciones de DiffServ Mediante Red Experimental con Routers Linux, Editorial Instituto Tecnológico Iberoamericano (ITI) de Colombia. Revista Gerencia Tecnológica Informática. Vol. 2, no. 5, pp. 60-68. Mayo 2004. ISSN 657-82364.

C.2.2 Congreso

Internacional

1. R. Cosma, A. Cabellos-Aparicio, J. Domenech-Benlloch, J.M. Gimenez-Guzman, J. Martinez-Bauset, M. Cristian, A. Fuentetaja, A. López, J. Domingo-Pascual, J. Quemada.
Measurement-Based Analysis of the Performance of several Wireless Technologies, The 16th IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks (LANMAN 2008), Cluj-Napoca, Rumanía. Septiembre 2008.

Nacional

1. José Manuel Giménez-Guzmán, Jorge Martínez-Bauset.
Red experimental DiffServ utilizando router-PCs con Sistema Operativo Linux, Jornadas Técnicas de RedIRIS 2003. Palma de Mallorca, España. Noviembre 2003.

Bibliografía

- [AA02] V.V. Anisimov y J.R. Artalejo, *Approximation of multiserver retrial queues by means of generalized truncated models*, TOP (Journal of Operations Research) **10** (2002), no. 1, 51–66.
- [AL02] A.S. Alfa y W. Li, *PCS networks with correlated arrival process and retrial phenomenon*, IEEE Transactions on Wireless Communications **1** (2002), 630–637.
- [AP02] J.R. Artalejo y M. Pozo, *Numerical calculation of the stationary distribution of the main multiserver retrial queue*, Annals of Operations Research **116** (2002), no. 1–4, 41–56.
- [AP07] ———, *Modelling Communication Systems with Phase Type Service and Retrial Times*, IEEE Communications Letters **11** (2007), no. 12, 955–957.
- [Art96] J.R. Artalejo, *Stationary analysis of the characteristics of the M/M/2 queue with constant repeated attempts*, Opsearch **33** (1996), 83–95.
- [Art99a] ———, *Accessible bibliography on retrial queues*, Mathematical and Computer Modelling **30** (1999), 1–6.
- [Art99b] ———, *A classified bibliography of research on retrial queues: Progress in 1990–1999*, TOP **7** (1999), 187–211.
- [Aze92] R. Azencott, *Simulated Annealing: Parallelization Techniques*, Wiley-Interscience, 1992.
- [Bar01] N. Bartolini, *Handoff and optimal channel assignment in wireless networks*, Mobile Networks and Applications (MONET) **6** (2001), no. 6, 511–524.

- [Bar04] F. Barceló, *Performance analysis of handoff resource allocation strategies through the state-dependent rejection scheme*, IEEE Transactions on Wireless Communications **3** (2004), no. 3, 900–909.
- [BB97] F. Barceló y S. Bueno, *Idle and inter-arrival time statistics in public access mobile radio (pamr) systems*, Proceedings of IEEE GLOBECOM, 1997, pp. 126–130.
- [BBP01] A.-L. Beylot, S. Boumerdassi, y G. Pujolle, *NACR: A new adaptive channel reservation in cellular communication systems*, Telecommunication Systems **17** (2001), 233–241.
- [BC02] N. Bartolini y I. Chlamtac, *Call admission control in wireless multimedia networks*, Proceedings of IEEE PIMRC, 2002.
- [Bel02] J.S. Belrose, *Reginald Aubrey Fessenden and the birth of wireless telephony*, IEEE Antennas and Propagation Magazine **44** (2002), no. 1, 38–47.
- [Ber82] D. Bertsekas, *Distributed dynamic programming*, IEEE Transactions on Automatic Control **27** (1982), no. 3, 610–616.
- [BJ00] F. Barceló y J. Jordán, *Channel holding time distribution in public telephony systems (PAMR and PCS)*, IEEE Transactions on Vehicular Technology **49** (2000), no. 5, 1615–1625.
- [Bre00] E.A. Bretz, *X marks the spot, maybe*, IEEE Spectrum **37** (2000), no. 4, 26–36.
- [Bro99] T.X. Brown, *Low power wireless communication via reinforcement learning*, Advances in Neural Information Processing Systems **12** (1999), 893–899.
- [Bro04] D. Broughton, *GNSS - a users' perspective in 2010*, Proceedings of the 46th International Symposium Electronics in Marine (ELMAR-2004), junio 2004.
- [BS99a] F. Barceló y J.I. Sánchez, *Probability distribution of the inter-arrival time to cellular telephony channels*, Proceedings of IEEE 49th Vehicular Technology Conference, 1999, pp. 762–766.
- [BS99b] R. Bekkers y J. Smits, *Mobile telecommunications: standards, regulation, and applications*, Artech House, 1999.

- [BVE99] C. Bettstetter, H.-J. Vögel, y J. Eberspächer, *GSM Phase 2+ General Packet Radio Service GPRS: architecture, protocols, and air interface*, IEEE Communication Surveys **2** (1999), no. 3, 2–14.
- [CB00] M.-H. Chiu y M.A. Bassiouni, *Predictive schemes for handoff prioritization in cellular networks based on mobile positioning*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications **18** (2000), no. 3, 510–522.
- [CC97] C. Chao y W. Chen, *Connection admission control for mobile multipleclass personal communications networks*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications **15** (1997), no. 8, 1618–1626.
- [CFL95] C.D. Carothers, R.M. Fujimoto, y Y.-B. Lin, *A re-dial model for personal communications services networks*, Proceedings of the IEEE 45th Vehicular Technology Conference (VTC '95), julio 1995, pp. 135–139.
- [CGK97] E.G. Coffman, E.N. Gilbert, y Y.A. Kogan, *Optimal redialing policies*, Proceedings of ITC-15, 1997, pp. 943–952.
- [CL95] E. Chlebus y W. Ludwin, *Is handoff traffic really poissonian?*, Proceedings of ICUPC'95, 1995, pp. 348–353.
- [CMT06] CMT Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones, *Informe anual*, 2006.
- [CN99] J. Carlström y E. Nordström, *Reinforcement Learning for Control of Self-Similar Call Traffic in Broadband Networks*, Teletraffic Engineering in a Competitive World—Proceedings of The 16th International Teletraffic Congress (1999), 571–580.
- [Coh57] J.W. Cohen, *Basic problems of telephone traffic theory and the influence of repeated calls*, Phillips Telecommunication Review **18** (1957), 49–100.
- [CS98] S. Choi y K.G. Shin, *Predictive and adaptive bandwidth reservation for handoffs in QoS-sensitive cellular networks*, Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communications Conference (SIGCOMM) (Vancouver, Canada), agosto 1998, pp. 155–166.

- [CS02] ———, *Adaptive bandwidth reservation and admission control in qos-sensitive cellular networks*, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems **13** (2002), no. 9, 882–897.
- [CSC94] C.-J. Chang, T.-T. Su, y Y.-Y. Chiang, *Analysis of a cutoff priority cellular radio system with finite queueing and rene-gingdropping*, IEEE/ACM Transactions on Networking **2** (1994), no. 2, 166–175.
- [DBGGMBCG05] M.J. Doménech-Benlloch, J.M. Giménez-Guzmán, J. Martínez-Bauset, y V. Casares-Giner, *Efficient and accurate methodology for solving multiserver retrial systems*, IEE Electronics Letters **41** (2005), no. 17, 967–969.
- [DCM92] C. Darken, J. Chang, y J. Moody, *Learning rate schedules for faster stochastic gradient search*, Neural Networks for Signal Processing II., Proceedings of the 1992 IEEE-SP Workshop, 1992, pp. 3–12.
- [DGMM99] T.K. Das, A. Gosavi, S. Mahadevan, y N. Marchallick, *Solving Semi-Markov Decision Problems Using Average Reward Reinforcement Learning*, Management Science **45** (1999), no. 4, 560–574.
- [DJ92] J.N. Daigle y N. Jain, *A queueing system with two arrival streams and reserved servers with application to cellular telephone*, Proceedings of INFOCOM'92, IEEE, mayo 1992, pp. 9C.2.1–9C.2.7.
- [DJKS00] S.K. Das, R. Jayaram, N.K. Kakani, y S.K. Sen, *A call admission and control scheme for quality-of-service (QoS) provisioning in next generation wireless networks*, Wireless Networks **6** (2000), no. 1, 17–30.
- [DKA99] M. Dhamayanthi-Kulavaratharasa y A.H. Aghvami, *Tele-traffic performance evaluation of microcellular personal communication networks (PCN's) with prioritized handoff procedures*, IEEE Transactions on Vehicular Technology **48** (1999), no. 1, 137–152.
- [DMS98] C. Drane, M. Macnaughtan, y C. Scott, *Positioning gsm tele-phones*, IEEE Communications Magazine **36** (1998), 46–54.

- [DS02] D.J. Daley y L.D. Servi, *Loss probabilities of hand-in traffic under various protocols: I. models and algebraic results*, Telecommunication Systems **19** (2002), no. 2, 209–226.
- [DS04] ———, *Loss probabilities of hand-in traffic under various protocols: II. model comparisons*, Performance Evaluation **55** (2004), no. 3–4, 231–249.
- [DTL03] S. Dharmaraja, K.S. Trivedi, y D. Logothetis, *Performance modeling of wireless networks with generally distributed handoff interarrival times*, Computer Communications **26** (2003), 1747–1755.
- [EAYH01] E.-S. El-Alfy, Y.-D. Yao, y H. Heffes, *Adaptive resource allocation with prioritized handoff in cellular mobile networks under QoS provisioning*, Proceedings of IEEE the 54th Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2001, pp. 2113–2117.
- [EE99] J.S. Evans y D. Everitt, *Effective bandwidth-based admission control for multiservice CDMA cellular networks*, IEEE Transactions on Vehicular Technology **48** (1999), no. 1, 36–46.
- [Ekl86] B. Eklundh, *Channel utilization and blocking probability in a cellular mobile telephone system with directed retry*, IEEE Transactions on Communications **COM-34** (1986), no. 4, 329–337.
- [EM93] A.I. Elwalid y D. Mitra, *Effective bandwidth of general Markovian traffic sources and admission control of high speed networks*, IEEE/ACM Transactions on Networking **1** (1993), no. 3, 329–343.
- [Esp03] Real Academia Española (ed.), *Diccionario de la lengua española (edición electrónica)*, 22^a ed., Espasa Calpe, 2003.
- [ET99] H.G. Ebersman y O.K. Tonguz, *Handoff ordering using signal prediction priority queuing in personal communication systems*, IEEE Transactions on Vehicular Technology **48** (1999), no. 1, 20–35.
- [Fal83] G.I. Falin, *Calculation of probability characteristics of a multiline system with repeat calls*, Moscow University Computational Mathematics and Cybernetics **1** (1983), 43–49.

- [Fal90] ———, *A survey on retrial queues*, *Queueing Systems* **2** (1990), 127–168.
- [Fan99] Y. Fang, *Hyper-erlang distributions and traffic modeling in wireless and mobile networks*, *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, septiembre 1999, pp. 398–402.
- [Fan00] R. Fantacci, *Performance evaluation of prioritized handoff schemes in mobile cellular networks*, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **49** (2000), no. 2, 485–493.
- [FFF⁺06] S. Frattasi, H. Fathi, F.H.P. Fitzek, R. Prasad, y M.D. Katz, *Defining 4G technology from the user's perspective*, *IEEE Network* **20** (2006), 35–41.
- [FNO99] A. Furuskär, J. Näslund, y H. Olofsson, *Edge-enhanced data rates for GSM and TDMA/136 evolution*, *Ericsson Review* (1999).
- [FR79] A.A. Fredericks y G.A. Reisner, *Approximations to stochastic service systems, with an application to a retrial model*, *The Bell System Technical Journal* **58** (1979), no. 3, 557–576.
- [FT97] G.I. Falin y J.G.C. Templeton, *Retrial queues*, Chapman and Hall, 1997.
- [GB06] M. Ghaderi y R. Boutaba, *Call admission control in mobile cellular networks: a comprehensive survey*, *Wireless Communications and Mobile Computing* **6** (2006), no. 1, 69–93.
- [GCR99] A. Gomez-Corral y M.F. Ramalhoto, *The stationary distribution of a markovian process arising in the theory of multiserver retrial queueing systems*, *Mathematical and Computer Modelling* **30** (1999), 159–170.
- [GGDBMB⁺05] J.M. Giménez-Guzmán, M.J. Doménech-Benlloch, J. Martínez-Bauset, V. Pla, y V. Casares-Giner, *Analysis of a handover procedure with queueing, retrials and impatient customers*, *Proceedings of HET-NETs '05 - Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks*, julio 2005.

- [GGMBP07] J.M. Giménez-Guzmán, J. Martínez-Bauset, y V. Pla, *A reinforcement learning approach for admission control in mobile multimedia networks with predictive information*, IEICE Transactions on Communications **E90-B** (2007), no. 7, 1663–1673.
- [GJL84] D.P. Gaver, P.A. Jacobs, y G. Latouche, *Finite birth-and-death models in randomly changing environments*, Advances in Applied Probability **16** (1984), no. 4, 715–731.
- [GRMBP04] D. García-Roger, J. Martínez-Bauset, y V. Pla, *Comparative evaluation of admission control policies in cellular multiservice networks*, Proceedings of the 16th International Conference on Wireless Communications (Wireless 2004), 2004, pp. 517–531.
- [GRMBP05] ———, *Admission control policies in multiservice cellular networks: Optimum configuration and sensitivity*, Lecture Notes in Computer Science (LCNS) **3427** (2005), 121–135.
- [Gué87] R.A. Guérin, *Channel occupancy time distribution in a cellular radio system*, IEEE Transactions on Vehicular Technology **35** (1987), 89–99.
- [Gué88] ———, *Queueing-blocking system with two arrival streams and guard channel*, IEEE Transactions on Communications **36** (1988), no. 2, 153–163.
- [GW87] B.S. Greenberg y R.W. Wolff, *An upper bound on the performance of queues with returning customers*, Journal of Applied Probability **24** (1987), no. 2, 466–475.
- [HF01] J. Hou y Y. Fang, *Mobility-based call admission control schemes for wireless mobile networks*, Wireless Communications and Mobile Computing **1** (2001), no. 3, 269–282.
- [HR86] D. Hong y S.S. Rappaport, *Traffic model and performance analysis for cellular mobile radio telephone systems with prioritized and nonprioritized handoff procedures*, IEEE Transactions on Vehicular Technology **VT-35** (1986), no. 3, 77–92.
- [HR97] J.M. Hernando-Rábanos, *Comunicaciones móviles*, Centro de Estudios Ramón Areces, Madrid, 1997.

- [HSSK01] H. Hidaka, K. Saitoh, N. Shinagawa, y T. Kobayashi, *Teletraffic characteristics of cellular communication for different types of vehicle motion*, IEICE Transactions on Communications **E84-B** (2001), no. 3, 558–565.
- [HSSK02] ———, *Self-similarity in cell dwell time caused by terminal motion and its effects on teletraffic of cellular communication networks*, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences **E85-A** (2002), no. 7, 1445–1453.
- [HT00] H. Holma y A. Toskala, *Wcdma for umts: radio access for third generation mobile communications*, John Wiley, 2000.
- [HUCPOG03] H. Heredia-Ureta, F.A. Cruz-Pérez, y L. Ortigoza-Guerrero, *Capacity optimization in multiservice mobile wireless networks with multiple fractional channel reservation*, IEEE Transactions on Vehicular Technology **52** (2003), no. 6, 1519–1539.
- [HZ98] P.L. Hiew y M. Zukerman, *Teletraffic issues related to channel allocation in digital mobile cellular networks*, Proceedings of the INFOCOM'98, vol. 1, 1998, pp. 43–50.
- [Ive06] V.B. Iversen, *Teletraffic theory and network planning*, COM, Technical University of Denmark, 2006, <http://com.dtu.dk/educaton/34340/material/telenookpdf.pdf>.
- [JL96] C. Jedrzycki y V.C.M. Leung, *Probability distributions of channel holding time in cellular telephony systems*, Proceedings of VTC'96, mayo 1996, pp. 247–251.
- [JS70] G. Jonin y J. Sedol, *Telephone systems with repeated calls*, Proceedings of ITC 6, 1970, pp. 435.1–435.5.
- [KN96] I. Katzela y M. Naghshineh, *Channel assignment schemes for cellular mobile telecommunications: A comprehensive survey*, IEEE Personal Communications (1996), 10–31.
- [Koz92] J.R. Koza, *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, The MIT Press, 1992.
- [KZ97] F. Khan y D. Zeghlache, *Effect of cell residence time distribution on the performance of cellular mobile networks*, Proceedings of VTC'97, IEEE, 1997, pp. 949 – 953.

- [LAN97] D.A. Levine, I.F. Akyildiz, y M. Naghshineh, *A resource estimation and call admission algorithm for wireless multimedia networks using the shadow cluster concept*, IEEE/ACM Transactions on Networking **5** (1997), no. 1, 1–12.
- [LC97] Y.-B. Lin y I. Chlamtac, *Effects of Erlang call holding times on PCS call completion*, Proceedings of INFOCOM'97, IEEE, 1997.
- [LCL98] B. Li, S.T. Chanson, y C. Lin, *Analysis of a hybrid cutoff priority scheme for multiple classes of traffic in multimedia wireless networks*, Wireless Networks Journal **4** (1998), no. 4, 279–290.
- [LE02] R. Lloyd-Evans, *QoS in integrated 3G networks*, Artech House, 2002.
- [Lee91] W.C.Y. Lee, *Smaller cells for greater performance*, IEEE Communications Magazine **29** (1991), no. 11, 19–23.
- [LJCP03] W.K. Lai, Y.-J. Jin, H.W. Chen, y C.Y. Pan, *Channel assignment for initial and handoff calls to improve the call-completion probability*, IEEE Transactions on Vehicular Technology **52** (2003), no. 4, 876–890.
- [LMN94] Y.-B. Lin, S. Mohan, y A. Noerpel, *PCS channel assignment strategies for hand-off and initial access*, IEEE Personal Communications **Third quarter** (1994), 47–56.
- [LPV06] J. Leino, A. Penttinen, y J. Virtamo, *Flow level performance analysis of wireless data networks: A case study*, Proceeding of IEEE ICC, vol. 3, 2006, pp. 961–966.
- [LR99] G. Latouche y V. Ramaswami, *Introduction to matrix analytic methods in stochastic modeling*, ASA-SIAM, 1999.
- [LV06] J. Leino y J. Virtamo, *An approximative method for calculating performance measures of markov processes*, Proceeding of the 1st international conference on Performance evaluation methodologies and tools (Pisa, Italy), octubre 2006.
- [LV07] ———, *Determining the moments of queue-length distribution of discriminatory processor-sharing systems with phase-type service requirements*, Proceedings of 3rd EuroNGI Conference

- on Next Generation Internet Networks (Trondheim, Norway), mayo 2007, pp. 205–208.
- [Mac05] F. Machihara, *Mobile telecommunication systems and generalized Erlang loss formula*, IEICE Transactions on Communications **E88-B** (2005), no. 1, 183–189.
- [Mah96] S. Mahadevan, *Average reward reinforcement learning: Foundations, algorithms, and empirical results*, Machine Learning **22** (1996), no. 1, 159–196.
- [MCL⁺01] M.A. Marsan, G.D. Carolis, E. Leonardi, R.L. Cigno, y M. Meo, *Efficient estimation of call blocking probabilities in cellular mobile telephony networks with customer retrials*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications **19** (2001), no. 2, 332–346.
- [McM95] D. McMillan, *Delay analysis of a cellular mobile priority queuing system*, IEEE/ACM Transactions on Networking **3** (1995), no. 3, 310–319.
- [MEBM06] I. Martín-Escalona, F. Barceló, y C. Manente, *A field study on terrestrial and satellite location sources for urban cellular networks*, Proceedings of GLOBECOM, 2006.
- [Mit98] M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, The MIT Press, 1998.
- [MP92] M. Mouly y M.-B. Pautet, *The GSM system for mobile communications*, Published by the authors, 1992.
- [MS01] K. Mitchell y K. Sohraby, *An analysis of the effects of mobility on bandwidth allocation strategies in multi-class cellular wireless networks*, Proceedings of IEEE INFOCOM, vol. 2, 2001, pp. 1075–1084.
- [Nel95] R. Nelson, *Probability, stochastic processes and queueing theory*, Springer-Verlag, 1995.
- [Neu81] M. Neuts, *Matrix-geometric solutions in stochastic models: An algorithmic approach*, The Johns Hopkins University Press, 1981.
- [NR90] M.F. Neuts y B.M. Rao, *Numerical investigation of a multiserver retrial model*, Queueing systems **7** (1990), no. 2, 169–189.

- [ODEa02] E. Onur, H. Deliç, C. Ersoy, y M.U. Çağlayan, *Measurement-based replanning of cell capacities in GSM networks*, *Computer Networks* **39** (2002), 749–767.
- [OR98a] P.V. Orlik y S.S. Rappaport, *A model of teletraffic performance and channel holding time characterisation in wireless cellular communication with general session and dwell time distributions*, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* **16** (1998), no. 5, 788–803.
- [OR98b] ———, *Traffic performance and mobility modeling of cellular communications with mixed platforms and highly variable mobilities*, *Proceedings of IEEE, Special Issue on Mobile Radio Centennial*, vol. 86, julio 1998, pp. 1464–1479.
- [OR01] ———, *On the handoff arrival process in cellular communications*, *Wireless Networks Journal (WINET)* **7** (2001), no. 2, 147–157.
- [PCG02a] V. Pla y V. Casares-Giner, *Analytical-numerical study of the handoff area sojourn time*, *Proceedings of IEEE GLOBECOM*, noviembre 2002, pp. 886–890.
- [PCG02b] ———, *Effect of the handoff area sojourn time distribution on the performance of cellular networks*, *Proceedings of IEEE MWCN*, septiembre 2002, pp. 401–405.
- [PCG03] ———, *Optimal admission control policies in multiservice cellular networks*, *Proceedings of the International Network Optimization Conference (INOC 2003)* (Paris, France), octubre 2003, pp. 466–471.
- [PCG05] ———, *Analysis of priority channel assignment schemes in mobile cellular communication systems: a spectral theory approach*, *Performance Evaluation* **59** (2005), no. 2–3, 199–224.
- [Pea89] C.E.M. Pearce, *Extended continued fractions, recurrence relations and two-dimensional markov processes*, *Advances in Applied Probability* **21** (1989), 357–375.
- [PG85] E.C. Posner y R. Guérin, *Traffic policies in cellular radio that minimize blocking of handoff calls*, *Proceedings of ITC 11*, 1985.

- [PGGMBCG04] V. Pla, J.M. Giménez-Guzmán, J. Martínez-Bauset, y V. Casares-Giner, *Optimal admission control using handover prediction in mobile cellular networks*, Proceedings of the 2nd International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NETs'04), julio 2004, pp. 44/1–10.
- [Pla05] V. Pla, *Contribución a la gestión de recursos en redes de acceso celulares. modelos analíticos y evaluación de prestaciones*, Tesis doctoral, Universidad Politécnica Valencia, 2005.
- [PRSADG05] J. Pérez-Romero, O. Sallent, R. Agustí, y M.A. Díaz-Guerra, *Radio resource management strategies in UMTS*, John Wiley, 2005.
- [PSo06] O. Pérez-Sanjuán y otros, *De las señales de humo a la sociedad del conocimiento*, Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, Madrid, 2006.
- [Put94] M.L. Puterman, *Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming*, John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA, 1994.
- [Rap93] S.S. Rappaport, *Blocking, hand-off and traffic performance for cellular communication systems with mixed platforms*, IEE Proceedings in Communications, Speech and Vision, vol. 140, octubre 1993, pp. 389–401.
- [RFG99a] E. Del Re, R. Fantacci, y G. Giambene, *Different queuing policies for handover request in low earth orbit mobile satellite systems*, IEEE Transactions on Vehicular Technology **48** (1999), no. 2, 448–458.
- [RFG99b] ———, *Handover queuing strategies with dynamic and fixed channel allocation techniques in low earth orbit mobile satellite systems*, IEEE Transactions on Communications **47** (1999), no. 1, 89–102.
- [RGS98] M. Ruggieri, F. Graziosi, y F. Santucci, *Modeling of the handover dwell time in cellular mobile communications systems*, IEEE Transactions on Vehicular Technology **47** (1998), no. 2, 489–498.

- [Ros70] S.M. Ross, *Applied probability models with optimization applications*, Holden-Day, 1970.
- [Ros95] K.W. Ross, *Multiservice loss models for broadband telecommunication networks*, Springer Verlag, 1995.
- [RT97] M. Rajaratnam y F. Takawira, *Hand-off traffic modeling in cellular networks*, Proceedings of the GLOBECOM, 1997, pp. 131–137.
- [RT99] ———, *Performance analysis of highway cellular networks using generalized arrival and generalized service time distributions*, Proceedings of ITC 16, vol. 3a, Teletraffic Science and Engineering, junio 1999, pp. 11–22.
- [RT01] ———, *Handoff traffic characterization in cellular networks under nonclassical arrivals and service time distributions*, IEEE Transactions on Vehicular Technology **50** (2001), no. 4, 954–970.
- [RTN97] R. Ramjee, D. Towsley, y R. Nagarajan, *On optimal call admission control in cellular networks*, Wireless Networks Journal **3** (1997), no. 1, 29–41.
- [RWO95] S.M. Redl, M.K. Weber, y M.W. Oliphant, *An introduction to GSM*, Artech House, 1995.
- [SAK⁺92] S. Sakagami, S. Aoyama, K. Kuboi, S. Shirota, y A. Akeyama, *Vehicle position estimates by multibeam antennas in multipath environments*, IEEE Transactions on Vehicular Technology **41** (1992), 63–68.
- [SB98] R.S. Sutton y A.G. Barto, *Reinforcement learning: an introduction*, MIT Press, 1998.
- [SBP04] S.M. Senouci, A.L. Beylot, y G. Pujolle, *Call admission control in cellular networks: A reinforcement learning solution*, International Journal of Network Management **14** (2004), 89–103.
- [Sch90] R. Schehrer, *On a cut-off priority queueing system with hysteresis and unlimited waiting room*, Computer Networks and ISDN Systems **20** (1990), 45–56.

- [SCZ07] W. Song, Y. Cheng, y W. Zhuang, *Improving voice and data services in cellular/WLAN integrated networks by admission control*, IEEE Transactions on Wireless Communications **6** (2007), no. 11, 4025–4037.
- [Ser02] L.D. Servi, *Algorithmic solutions to two-dimensional birth-death processes with application to capacity planning*, Telecommunication Systems **21** (2002), no. 2–4, 205–212.
- [SK04] W.-S. Soh y H.S. Kim, *Dynamic bandwidth reservation in cellular networks using road topology based mobility prediction*, Proceedings of the Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM) (Hong Kong, China), vol. 4, marzo 2004, pp. 2766–2777.
- [SK06] ———, *A predictive bandwidth reservation scheme using mobile positioning and road topology information*, IEEE/ACM Transactions on Networking **14** (2006), no. 5, 1078–1091.
- [SKNS00] N. Shingawa, T. Kobayashi, K. Nakano, y M. Sengoku, *Teletraffic characteristics in prioritized handoff control method considering reattempt calls*, IEICE Transactions on Communications **E83-B** (2000), no. 8, 1810–1818.
- [Soc02] IEEE Communications Society (ed.), *A brief history of communications*, IEEE, 2002.
- [SPS99] R.S. Sutton, D. Precup, y S. Singh, *Between MDPs and semi-MDPs: A framework for temporal abstraction in reinforcement learning*, Artificial Intelligence **112** (1999), no. 1–2, 181–211.
- [SS97] M. Sidi y D. Starobinski, *New call blocking versus handoff blocking in cellular networks*, Wireless Networks Journal (WI-NET) **3** (1997), no. 1, 15–27.
- [SSOZ07] M. Sanabani, S. Shamala, M. Othman, y Z. Zukarnain, *An Enhanced Bandwidth Reservation Scheme Based on Road Topology Information for QoS Sensitive Multimedia Wireless Cellular Networks*, Lecture Notes on Computer Science **4706** (2007), 261–274.

- [Ste99] S.N. Stepanov, *Markov models with retrials: The calculation of stationary performance measures based on the concept of truncation*, *Mathematical and Computer Modelling* **30** (1999), 207–228.
- [Sut90] R.S. Sutton, *Integrated architectures for learning, planning, and reacting based on approximating dynamic programming*, *Proceedings of the Seventh International Conference on Machine Learning* (1990), 216–224.
- [Tab01] Z. Tabakovic, *Performance analysis of channel assignment schemes*, *Proceedings of the VTC 2001 Spring*, vol. 2, mayo 2001, pp. 911–915.
- [TB00] H. Tong y T.X. Brown, *Adaptive call admission control under quality of service constraints: a reinforcement learning solution*, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* **18** (2000), no. 2, 209–221.
- [TGM97] P. Tran-Gia y M. Mandjes, *Modeling of customer retrial phenomenon in cellular mobile networks*, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications* **15** (1997), no. 8, 1406–1414.
- [TJ91] S. Tekinay y B. Jabbari, *Handover and channel assignment in mobile cellular networks*, *IEEE Communications Magazine* (1991), 42–46.
- [TJ92] ———, *A measurement-based prioritization scheme for handovers in mobile cellular networks*, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* **10** (1992), no. 8, 1343–1350.
- [TO98] P. Tadepalli y D.K. Ok, *Model-based average reward reinforcement learning*, *Artificial Intelligence* **100** (1998), no. 1-2, 177–224.
- [TRV98] N.D. Tripathi, J.H. Reed, y H.F. VanLandingham, *Handoff in cellular systems*, *IEEE Personal Communications* (1998), 26–37.
- [Van01] R.J. Vanderbei, *Linear Programming: Foundations and Extensions*, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [VC00] A.G. Valkó y A.T. Campbell, *An efficiency limit of cellular mobile systems*, *Computer Communications* **23** (2000), no. 5-6, 441–451.

- [Web99] W. Webb, *The complete wireless communications professional: A guide for engineers and managers*, Artech House, Boston - London, 1999.
- [Wil56] R.I. Wilkinson, *Theories for toll traffic engineering in the USA*, *The Bell System Technical Journal* **35** (1956), no. 2, 421–507.
- [XT03] A.E. Xhafa y O.K. Tonguz, *Does mixed lognormal channel holding time affect the handover performance of guard channel scheme ?*, *Proceedings of IEEE GLOBECOM*, 2003, pp. 3452–3456.
- [XT04] ———, *Dynamic priority queueing of handover calls in wireless networks: An analytical framework*, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* **22** (2004), no. 5, 904 – 916.
- [YL02] F. Yu y V.C.M. Leung, *Mobility-based predictive call admission control and bandwidth reservation in wireless cellular networks*, *Computer Networks* **38** (2002), no. 5, 577–589.
- [YR97] A. Yener y C. Rose, *Genetic algorithms applied to cellular call admission: local policies*, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **46** (1997), no. 1, 72–79.
- [YT87] T. Yang y J.G. Templeton, *A survey on retrial queues*, *Queueing Systems* **2** (1987), 201–233.
- [YU93] C.H. Yoon y C.K. Un, *Performance of personal portable radio telephone systems with and without guard channels*, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* **11** (1993), no. 6, 911–917.
- [YWL05] F. Yu, V.W.S. Wong, y V.C.M. Leung, *Performance enhancement of combining QoS provisioning and location management in wireless cellular networks*, *IEEE Transactions on Wireless Communications* **4** (2005), no. 3, 943–953.
- [YWL06] ———, *Efficient QoS Provisioning for Adaptive Multimedia in Mobile Communication Networks by Reinforcement Learning*, *Mobile Networks and Applications* **11** (2006), no. 1, 101–110.
- [ZC99] H. Zeng y I. Chlamtac, *Handoff traffic distribution in cellular networks*, *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 1999, pp. 413–417.

- [ZD97] M.M. Zonoozi y P. Dassanayake, *User mobility modeling and characterization of mobility patterns*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications **15** (1997), no. 7, 1239–1252.
- [Zha02] Y. Zhao, *Standardization of mobile phone positioning for 3g systems*, IEEE Communications Magazine **40** (2002), 108–116.
- [ZK04] R. Zander y J.M. Karlsson, *Predictive and adaptive resource reservation (parr) for cellular networks*, International Journal of Wireless Information Networks **11** (2004), no. 3, 161–171.