



UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

Modelo Adaptativo de Partilha de Largura de Banda em Cenário de Auto-estrada

Gonçalo João Costa Jacinto
(Licenciado)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Matemática Aplicada

Orientador: Doutor António Manuel Pacheco Pires

Co-Orientador: Doutor Nelson Gomes Rodrigues Antunes

Júri:

Presidente: Doutor António Manuel Pacheco Pires

Vogais: Doutora Luísa da Conceição dos Santos do Canto e Castro de Loura

Doutor Nelson Gomes Rodrigues Antunes

Doutora Cláudia Rita Ribeiro Coelho Nunes Philippart

Julho de 2004

Modelo Adaptativo de Partilha de Largura de Banda em Cenário de Auto-estrada

Nome: Gonçalo João Costa Jacinto

Curso de Mestrado em: Matemática Aplicada

Orientador: Professor Doutor António Manuel Pacheco Pires

Co-orientador: Professor Doutor Nelson Gomes Rodrigues Antunes

Provas concluídas em:

Resumo: As redes móveis sem fios multimédia são vistas hoje em dia como um dos factores chave para o desenvolvimento da infra-estrutura de comunicação global. Neste trabalho é proposto um modelo de previsão e de empréstimo de largura de banda entre células, de forma a manter a qualidade de serviço das chamadas durante os períodos de congestão.

É generalizado o modelo proposto por Antunes, Pacheco e Rocha (2000) para um cenário de auto-estrada em que o processo de chegadas de móveis é um processo de Poisson não homogéneo. Prova-se que as distribuições espaciais do número de móveis por tipo de chamada num instante fixo são processos de Poisson não homogéneos independentes. Com base neste resultado são obtidas estimativas da capacidade requerida e da probabilidade de bloqueio em cada célula, para actualização da estratégia de empréstimo. Para validar os resultados analíticos e aferir o desempenho da estratégia de empréstimo são apresentados resultados de simulações.

Palavras chave: Controlo de rede, mobilidade, modelação de tráfego, processo de Poisson não homogéneo, redes sem fios, teletráfego.

Adaptative Bandwidth Sharing Model in a Highway Scenario

Abstract: Mobile broadband wireless networks are seen today as one of the key factors for the development of the global communication infrastructure. In this work, we propose a model to borrow and predict the bandwidth in cells, aiming at maintaining the quality service of calls during congestion periods.

The model proposed by Antunes, Pacheco and Rocha (2000) for the highway scenario is generalized by choosing for the arrival process a nonhomogeneous Poisson process. We show that the spatial distributions of the number of mobiles per traffic state in a fixed instant are independent nonhomogeneous Poisson processes. Based on this result, we estimate the required capacity in a cell, which is used in the implementation of the borrowing strategy. To evaluate the performance of the borrowing strategy, simulation results are presented.

Keywords: Mobility, network control, nonhomogeneous Poisson process, teletraffic, traffic modelling, wireless networks.

Agradecimentos

Foi um enorme prazer ter desenvolvido este trabalho sob a orientação dos professores António Pacheco e Nelson Antunes.

Ao Professor António Pacheco por desde logo ter acedido orientar esta dissertação e, principalmente, por todo o seu apoio e disponibilidade demonstrados ao longo deste tempo. Agradeço-lhe também por a sua orientação me ter permitido crescer como investigador e como pessoa. Por me ter mostrado o seu rigor, a sua qualidade científica, a capacidade de trabalho e por já ser uma referência para mim.

Ao Professor Nelson Antunes, que por toda a sua forma de estar me permitiu um enorme conforto. Por todo o seu apoio, que nunca deixou de auxiliar e de sugerir. Por ter sido incansável na melhoria do trabalho e no alcance do rigor. Por todo o seu interesse, capacidade de trabalho e capacidade científica.

A ambos o meu muito obrigado.

Agradeço a todos os meus colegas de Departamento que enquanto partilhávamos conhecimentos e angústias, nos apoiávamos e desenvolvíamos as nossas dissertações.

À minha família: Pai, Mãe e irmãos, Vasco e João, obrigado por estarem sempre presentes e sempre me terem apoiado.

A todos os meus amigos, que sabem que não posso fazer distinções particulares por serem todos muito importantes. São eles que estão presentes nos bons e nos maus momentos.

Finalmente, à minha namorada Ana, por durante todo este tempo me ter apoiado. Por ser a pessoa que é, por ser tão importante e única na sua maneira de ser. A ela devo-lhe muito, mesmo muito.

A todos muito obrigado.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Redes sem fios	1
1.2	O problema	5
1.3	Trabalho relacionado	7
1.4	Objectivos e metodologia	10
1.5	Organização da dissertação	13
2	O modelo de auto-estrada	14
2.1	Preliminares	14
2.2	Descrição do modelo	19
2.3	Número de móveis nas células	21
2.4	Processos de handoff	23
3	O modelo adaptativo de partilha de largura de banda	26
3.1	Preliminares	27
3.2	Caracterização do cluster	29
3.3	Evolução do cluster	31
3.4	Caracterização da estratégia de empréstimo	33
3.5	Validação da estratégia de empréstimo	39
4	Desempenho do modelo	41
4.1	Densidade espacial do número de móveis	42
4.2	Representação gráfica da densidade de móveis	44
4.3	Estimativa exacta do estado da rede	47

4.4	Estimativa aproximada do estado da rede	52
4.5	Resultados analíticos	55
5	Simulação	65
5.1	Desempenho com/sem estratégia de empréstimo	67
5.2	Desempenho com diferentes classes de tráfego	80
6	Conclusão e trabalho futuro	83

Lista de Figuras

1.1	Arquitectura da rede GSM.	3
3.1	Representação de um cluster no troço de células em estudo.	30
3.2	Diagrama de fluxo para construção do cluster.	34
4.1	Taxa periódica de entradas de móveis na auto-estrada.	45
4.2	Número médio de móveis no intervalo $(x - 10, x]$ em função de x e t , e no intervalo $(40, 50]$ em função de t	46
4.3	Densidade de móveis em cada ponto x e no quilómetro 50 da auto-estrada, no instante t	47
4.4	Densidade da localização de um móvel escolhido ao acaso no intervalo $(x - 10, x]$ e na célula 5, no instante t	48
4.5	FDC do número de móveis que transitam de célula e após h unidades de tempo se encontram activos, variando o número médio de móveis na célula.	57
4.6	FDC do número de novas chamadas, variando o número médio de móveis inactivos na célula.	57
4.7	FDC do número de móveis que transitam de célula, para diferentes tempos entre estimativas.	59
4.8	FDC do número de móveis que efectuam novas chamadas, variando os tempos médios de permanência no estado activo.	60
4.9	FDC do número de móveis que transitam de célula e se encontram activos após h unidades de tempo, variando os tempos médios de permanência no estado activo.	61

4.10	FDC do número de móveis que transitam de célula e que após h unidades de tempo se encontram activos, para diferentes dimensões das células.	61
4.11	FDC do número de móveis que efectuam novas chamadas, para diferentes dimensões das células.	62
4.12	Comparação entre as capacidades observadas e as capacidades estimadas através da aproximação à distribuição normal.	63
4.13	Comparação entre as capacidades observadas e as capacidades estimadas através da aproximação à distribuição normal, na presença de um período de congestão.	64
5.1	Probabilidade de bloqueio por célula.	70
5.2	Probabilidade de bloqueio de chamadas de handoff por célula.	70
5.3	Probabilidade de bloqueio de novas chamadas por célula.	71
5.4	Intervalos de confiança a 95% para a probabilidade de bloqueio.	74
5.5	Intervalos de confiança a 95% para a probabilidade de bloqueio de chamadas handoff.	74
5.6	Intervalos de confiança a 95% para a probabilidade de bloqueio de novas chamadas.	75
5.7	Comparação das probabilidades de bloqueio de chamadas de handoff por célula, considerando a velocidade constante (100 Km/h) e com distribuição triangular simétrica (com média de 100 Km/h.)	75
5.8	Probabilidade de bloqueio por célula com a estratégia de empréstimo activa nas células 3 e 8.	76
5.9	Probabilidade de bloqueio de chamadas de handoff por célula com a estratégia de empréstimo activa nas células 3 e 8.	77
5.10	Probabilidade de bloqueio de novas chamadas por célula com a estratégia de empréstimo activa nas células 3 e 8.	77
5.11	Probabilidade de bloqueio por célula, para diferentes valores do tempo entre estimativas.	79
5.12	Probabilidade de bloqueio de chamadas de handoff por célula, para diferentes valores do tempo entre estimativas.	79

5.13	Diagrama de transições do processo de teletráfego.	80
5.14	Probabilidade de bloqueio por célula, considerando duas classes de tráfego.	81
5.15	Probabilidade de bloqueio de chamadas handoff por célula, considerando duas classes de tráfego.	81
5.16	Probabilidade de bloqueio de novas chamadas por célula, considerando duas classes de tráfego.	82

Lista de Tabelas

5.1	Estimativas das probabilidades de bloqueio e respectivos intervalos de confiança a 95% no troço de células.	73
5.2	Estimativas das probabilidades de bloqueio e respectivos intervalos de confiança a 95% no troço de células, considerando duas classes de tráfego.	82

Glossário

1G	primeira geração de comunicações móveis
2G	segunda geração de comunicações móveis
2.5G	segunda geração e meia de comunicações móveis
3G	terceira geração de comunicações móveis
ANACOM	Autoridade Nacional de Telecomunicações
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Subsystem
BTS	Base Transceiver Station
CDMA	code division multiple access
CMTC	cadeia de Markov em tempo contínuo
CMTD	cadeia de Markov em tempo discreto
D-AMPS	Digital American Mobile Phone System
DCA	dynamic channel allocation
FCA	fixed channel allocation
FDC	função de distribuição cumulativa
FDMA	frequency division multiple access
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications
HCA	hybrid channel allocation
ISDN	Integrated Services Digital Network
LBSB	load balancing with selective borrowing
MS	Mobile Station

MSC	Mobile Services Switching Center
$N(0,1)$	distribuição normal padrão
NMS	Network Management Subsystem
NSS	Network Subsystem
PDC	Personal Digital Cellular
PFMM	processo de fluído Markov modulado
PP	processo de Poisson
PPNH	processo de Poisson não homogéneo
PSTN	Public Switched Telephone Network
RNC	Radio Network Controller
RNS	Radio Network Subsystem
SDMA	space division multiple access
SIM	Subscriber Identity Module
TDMA	time division multiple access
TLC	teorema do limite central
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UCLA	University of California Los Angeles
Um	interface rádio para a BSS
US-TDMA	United States time division multiple access
Uu	interface rádio para a BS
WCDMA	wideband CDMA

Capítulo 1

Introdução

O trabalho que apresentamos nesta dissertação baseia-se numa aplicação das probabilidades e estatística à área de engenharia das telecomunicações, mais especificamente, em redes de telecomunicações sem fios.

Propomos um modelo de previsão e de empréstimo de largura de banda entre células de forma a manter a qualidade de serviço das chamadas durante os períodos de congestão num cenário de auto-estrada. Para isso é necessário utilizar modelos que integrem a mobilidade do utilizador e as exigências de teletráfego das futuras gerações de redes de telecomunicações sem fios.

1.1 Redes sem fios

Nesta secção começamos por descrever sucintamente a evolução histórica das redes de telecomunicações sem fios, baseado em [10].

As primeiras indicações de comunicação sem fios remontam a tempos anteriores a 1800. Os índios, por exemplo, comunicavam entre si por intermédio de sinais de fumo, que consistiam numa verdadeira rede de comunicação sem fios. O mundo evoluiu muito desde esses dias.

Posteriormente, em 1894, quando Marconi realizou experiências com ondas de rádio (ondas hertzianas), com o objectivo de produzir e detectar ondas de rádio em longas distâncias, iniciou-se um longo caminho até aos sistemas actuais. Em 1896, Marconi foi

bem sucedido e obteve uma patente estabelecendo a primeira fábrica de rádios do mundo. Em 1905 a primeira comunicação sem fios foi efectuada em código de Morse.

Após diversos avanços no desenvolvimento de tecnologia, a introdução de redes celulares móveis de primeira geração (1G) no início dos anos 80 do século passado, representou um enorme salto nas comunicações móveis (em capacidade e mobilidade). As redes celulares de 1G transmitiam apenas dados de voz e utilizavam transmissões analógicas.

As redes celulares permitem que os subscritores comuniquem enquanto se encontram em movimento. Estas redes encontram-se tipicamente organizadas em regiões geográficas denominadas *células*, com tamanho e forma definidos de acordo com os factores de propagação e de transmissão das ondas de rádio. Cada célula tem atribuída uma *estação base* que fornece uma ligação rádio com os subscritores. Os *móveis* são subscritores com equipamento móvel. Durante uma comunicação (chamada) é estabelecida uma ligação rádio entre o móvel e a estação base da respectiva célula de cobertura.

Se durante a duração da chamada um móvel se move de uma célula para outra, a chamada terá que ser permutada entre as estações base atribuídas a ambas as células. Esta acção é chamada de *handoff*. A rede é responsável por assegurar que os móveis, enquanto se deslocam na área de cobertura da rede, possam manter as suas ligações sem interrupções e sem percepção dos handoffs. A estrutura da célula pode ser encarada como: unidimensional, como por exemplo em auto-estradas; bidimensional, cobrindo uma secção de ruas de uma cidade; e tridimensional, em edifícios.

As redes de segunda geração (2G) foram desenvolvidas devido à necessidade de melhoramento da qualidade das transmissões, da capacidade e da cobertura das redes. Os avanços na tecnologia dos semicondutores e dispositivos de micro-ondas trouxeram a transmissão digital às comunicações móveis. Ainda dominam as transmissões de voz, mas as exigências de correio electrónico, mensagens curtas e transmissão de dados começaram a ter um rápido crescimento e um papel importante nas actuais redes de comunicação. As redes digitais de segunda geração têm o seu maior exemplo na rede GSM (Global System for Mobile communications), na Europa, e suas derivadas, D-AMPS (Digital American Mobile Phone System, também denominada US-TDMA), nos Estados Unidos, PDC (Personal Digital Cellular) no Japão e IS-95 (também denominada CDMA) no Japão e nos

Estados Unidos.

Apresentamos de seguida uma descrição mais detalhada das redes GSM e UMTS (Universal Mobile Telecommunication System), que é a sucessora natural das redes GSM, seguindo os livros de Redl *et al.* [22] e Kaaranen *et al.* [13], respectivamente.

As redes GSM são compostas por três estruturas principais, a NSS (Network Subsystem), a BSS (Base Station Subsystem) e o MS (Mobile Station). O MS é uma combinação do equipamento móvel e do SIM (Subscriber Identity Module) que contém os dados do utilizador, permitindo o acesso aos serviços da rede. A BSC (Base Station Controller) e a BTS (Base Transceiver Station) são as componentes da BSS. A BSC controla os recursos rádio de uma ou mais BTS e a BTS suporta a interface rádio (*Um interface*) entre o MS e a BTS. O MSC (Mobile Switching Centre) é o elemento central da NSS sendo responsável pela ligação à rede fixa (tais como a PSTN (Public Switched Telephone Network) e a ISDN (Integrated Services Digital Network)). Na Figura 1.1 podemos observar a arquitectura da rede GSM.

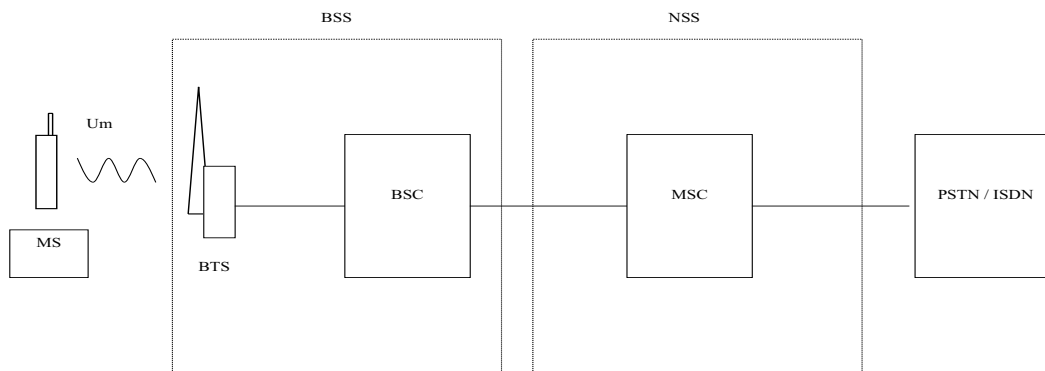


Figura 1.1: Arquitectura da rede GSM.

O controlo dos recursos de rádio revelou ser um dos maiores problemas nas redes de telecomunicações sem fios. Foram desenvolvidas várias técnicas para permitir a vários

utilizadores acedem ao mesmo tempo ao espectro de rádio disponível.

No FDMA (Frequency Division Multiple Access), o espectro disponível é dividido em várias frequências e cada frequência é atribuída exclusivamente a um utilizador durante a chamada. No TDMA (Time Division Multiple Access), os utilizadores de uma dada frequência dividem a sua utilização no tempo, ou seja, cada utilizador tem um curto período de tempo (*time slot*) para transmissão. Este procedimento é repetida ciclicamente, o que dá a impressão de uma ligação contínua. No CDMA (Code Division Multiple Access), todos os utilizadores podem ocupar a mesma frequência simultaneamente e os seus sinais são separados através de códigos. No SDMA (Space Division Multiple Access) as frequências são reutilizadas em função da distância. Se a distância entre duas estações base utilizando a mesma frequência é suficientemente grande, a interferência entre ambas é tolerável.

A maior parte dos sistemas de 2G utilizam o SDMA conjuntamente com outras técnicas mencionadas acima para melhorar a capacidade da rede. A rede GSM é baseada na tecnologia TDMA. A optimização na codificação dos canais e um conjunto de melhoramentos na rede, permitiram que os ritmos de transmissão aumentassem para 14 kbits/s nas redes GSM, sendo no entanto insuficientes devido às exigências colocadas pelo tráfego de internet. Para a tornar mais eficaz na transferência de dados, foi proposto o GPRS (General Packet Radio Services), que constitui a denominada segunda geração e meia de redes sem fios (2.5G). Através do GPRS, um móvel consegue obter ritmos de transmissão superiores a 64 kbits/s.

Neste momento as redes de telecomunicações preparam o avanço para a terceira geração de redes móveis (3G), permitindo a integração de vários tipos de transmissão, como voz, dados e vídeo, com velocidades muito superiores às actuais redes de telecomunicações. A mais importante rede deste tipo é a UMTS.

O aumento da eficiência e da flexibilidade nas redes UMTS é devido à utilização de nova tecnologia de acesso WCDMA (Wideband CDMA), que é um método de acesso global das redes de terceira geração. A WCDMA, é uma variante do CDMA e apresenta, sob certas condições, uma melhor eficiência espectral que o CDMA. A arquitectura da rede UMTS é semelhante à arquitectura das principais redes de 2G, com diferenças nos

elementos da rede com funções de rádio devido à nova tecnologia de acesso.

1.2 O problema

Numa rede celular, cada célula têm uma quantidade fixa de largura de banda. No entanto, quer o movimento dos móveis, quer os diferentes tipos de chamada existentes com diferentes exigências de largura de banda, quer a ocorrência de períodos de congestão (tais como os que ocorrem em horas de ponta), contribuem para que o teletráfego não se distribua homogeneamente entre as células dando origem a picos de carga. Durante estes, algumas células poderão ter uma capacidade insuficiente para garantir a qualidade de serviço estipulada pelo operador da rede, enquanto células vizinhas que não se encontrem afectadas pelo pico de carga poderão ter largura de banda disponível.

Desta forma, os operadores das redes móveis deverão desenvolver estratégias para lidar com a ocorrência de períodos de congestão da rede, visto que a qualidade de serviço assumida poderá ficar em risco. Uma das estratégias mais comuns para prevenir a degradação da qualidade de serviço são as estratégias de alocação de recursos [12]. Nas redes GSM, foram desenvolvidos algoritmos para utilizarem eficientemente os canais (time slots em GSM) disponíveis, dos quais destacamos a FCA (Fixed Channel Allocation), a DCA (Dynamic Channel Allocation) e a HCA (Hybrid Channel Allocation).

Na FCA, tal como o nome indica, é atribuído a cada célula um número fixo destes canais. Uma nova chamada é aceite numa célula se algum dos canais dessa célula se encontra disponível. Esta estratégia tem melhores desempenhos quando o tráfego apresenta um comportamento uniforme nas células e sob condições de tráfego intenso. No entanto, em condições de tráfego moderado, grande parte dos canais das células não é utilizada. Nestas condições, a DCA apresenta um melhor desempenho. Aqui todos os canais são combinados num todo e podem ser usados por quaisquer células para servir uma nova chamada, resultando numa utilização mais eficiente da largura de banda. Finalmente, a HCA resulta de uma combinação das duas estratégias anteriores, com o objectivo de conduzir a uma maior eficiência na utilização do espectro de frequências. A cada célula é alocado um número fixo de canais e os canais remanescentes são utilizados por todas as

células à medida das necessidades.

No entanto, muitos operadores de redes de telecomunicações móveis optaram por não incorporar este tipo de estratégias, o que levou ao desenvolvimento de algoritmos de empréstimo entre células. Estes algoritmos, também denominados de estratégias de empréstimo, permitem que células com capacidade disponível emprestem largura de banda (frequências, nas redes GSM) às células que se encontram afectadas pelo pico de carga. Quando a largura de banda emprestada já não é necessária, esta é devolvida à célula original. Estas estratégias usam informação corrente da carga ocupada na rede para, dinamicamente e temporariamente, efectuarem empréstimos de largura de banda. Usualmente, estas estratégias efectuem a predição do movimento do tráfego para determinarem o empréstimo a ser realizado entre células. Devido à monitorização do tráfego nas auto-estradas, é possível apurar com alguma precisão o movimento do pico de tráfego com algum espaço de tempo, que permite que os empréstimos entre células sejam efectuados atempadamente.

Neste trabalho propomos um modelo de previsão e de empréstimo de largura de banda entre células de forma a manter a qualidade de serviço das chamadas durante os períodos de congestão. Este modelo é orientado para as redes móveis com diferentes classes de tráfego.

Para focar este trabalho no panorama nacional das redes de telecomunicações, de realçar o estudo efectuado em Portugal pela ANACOM (Autoridade Nacional de Comunicações), em Dezembro de 2002, que realizou testes à qualidade do som dos três operadores móveis nacionais e à taxa de chamadas terminadas com êxito. Para isso, foram efectuadas viagens entre Lisboa e Porto pela auto-estrada A1. Os métodos de análise consistiram num conjunto de chamadas realizadas para as três redes num veículo em movimento, de forma a apurar o grau de cobertura, a acessibilidade e a qualidade áudio oferecido naquele momento e naquele local por cada um dos operadores.

1.3 Trabalho relacionado

Os modelos lineares de tráfego representam cenários de ruas ou auto-estradas. Para estes cenários, a teoria de tráfego de veículos (mobilidade) terá que ser combinada com a teoria de teletráfego de forma a poder ser aplicada a redes de telecomunicações móveis.

Em estudos de tráfego de veículos a modelação da mobilidade pode ser muito detalhada. No entanto, nos modelos de tráfego com componente de teletráfego a parte correspondente à mobilidade terá que ser simplificada, quando comparada com modelos que tratam apenas os aspectos de mobilidade, de forma a que os modelos integrados sejam tratáveis analiticamente. A este respeito, destacam-se, e.g., os trabalhos de El-Dolil, Wong e Steele [8], Leung, Massey e Whitt [17] e Antunes, Pacheco e Rocha [3].

O trabalho de El-Dolil, Wong e Steele [8] considera um número fixo de móveis em cada célula para obter a probabilidade de bloqueio de novas chamadas e de chamadas de handoff, não incorporando o efeito da mobilidade no teletráfego, de fulcral importância para o controlo da rede.

No trabalho de Leung, Massey e Whitt [17] é proposto um modelo de teletráfego integrado para uma auto-estrada. Os autores consideram que os móveis chegam à auto-estrada independentemente e de acordo com um processo de Poisson não homogéneo com intensidades determinísticas dependendo da posição e do tempo, pelo que o modelo fornece uma boa ideia do impacto da mobilidade na densidade do número de móveis na auto-estrada. O modelo proposto considera dois tipos de móveis, activos e inactivos, e o estado de cada veículo evolui de acordo com uma CMTC (cadeia de Markov em tempo contínuo) não estacionária. É assumido que cada chamada ocupa um único canal e que não existem restrições relativamente ao número de canais em cada célula. Desta forma, os aspectos de teletráfego incorporados no modelo são bastante simples, não indo ao encontro das necessidades das actuais redes de telecomunicações multimédia. Além disso, a velocidade dos móveis é determinística e logo o modelo não incorpora a inerente variabilidade existente na velocidade dos diferentes móveis.

No trabalho de Antunes, Pacheco e Rocha [3] é proposto um modelo de tráfego para o cenário de auto-estrada, orientado para a segunda e terceira geração de redes de teleco-

municacões, onde os aspectos de mobilidade e teletráfego estão integrados. Neste modelo, os móveis podem efectuar diferentes tipos de chamada provenientes de diferentes classes de tráfego. Estes autores consideram um processo de Poisson homogéneo para descrever o processo de chegadas de móveis à auto-estrada e a velocidade dos móveis segue uma distribuição geral.

Em oposição às abordagens tradicionais, este modelo descreve não só os móveis activos na rede, mas também os móveis inactivos, o que permite um aumento de precisão na gestão do tráfego. A principal vantagem deste modelo é ser adequado quer para controlo quer para planeamento da rede. Estes autores obtiveram a distribuição do número de móveis em cada célula e a probabilidade estacionária de bloqueio - que são importantes para o planeamento da rede. Derivaram também a distribuição do número de handoffs e de novas chamadas num curto intervalo de tempo - importantes para controlo da rede.

Iremos agora introduzir os trabalhos mais relevantes de alocação de canais, utilizados no controlo da rede, dos quais destacamos os trabalhos de Das, Sen e Jayaram [5], Lindsay-Stewart *et. al.* [18] e Ule e Boucherie [23]. Os esquemas de alocação de canais apresentados nestes trabalhos estão direccionados para as redes GSM, pelo que além de serem modelos de tráfego bastante simples não incorporam as correntes necessidades de várias classes de teletráfego, com diferentes exigências de qualidade de serviço.

No esquema proposto por Das, Sen e Jayaram [5], foi proposta uma estratégia de empréstimo de canais entre células denominada LBSB (load balancing with selective borrowing). É considerado um processo de Poisson homogéneo para descrever o processo de chegadas e partidas das chamadas numa célula e os móveis são classificados de *novos*, *de saída* ou *outros*. O estado de cada célula é descrito por uma CMTD (cadeia de Markov em tempo discreto). Uma célula é classificada de *quente*, se o seu grau de frieza (definido como a razão entre o número de canais ocupados e o número total de canais alocados nessa célula) supera um valor limite. Caso contrário a célula é classificada de fria. Esta estratégia consiste em duas partes distintas: o empréstimo de canais entre células e a atribuição de canais. O empréstimo de canais permite a migração de canais das células frias para as células quentes através de um algoritmo de empréstimo. Apenas as células quentes podem efectuar empréstimo de canais e os canais emprestados são atribuídos aos

utilizadores que se encontram de saída da célula quente. A atribuição de canais determina a forma como os canais emprestados são atribuídos aos utilizadores na célula quente. A atribuição de canais é uma forma de maximizar a utilização dos recursos por parte das células. Os canais existentes em cada célula são classificados em quatro classes, sendo a alocação de canais definida através de um esquema de prioridade, com máxima prioridade para as chamadas de handoff.

Os autores mostraram que, no caso da rede se encontrar congestionada, o algoritmo LBSB apresenta um bom desempenho quando comparado com modelos de empréstimo simples. No entanto, a desvantagem da estratégia LBSB é que é um esquema centralizado, isto é, o algoritmo de empréstimo é accionado periodicamente por um servidor central localizado numa MSC, o que faz toda a estratégia depender apenas de uma MSC. Além disso, as BS enviam constantes actualizações do estado das células à MSC originando, em ambiente onde o teletráfego varia dinamicamente, um elevado teletráfego de controle.

Estes autores desenvolveram ainda extensões do modelo LBSB. Em [6], é proposto um esquema distribuído que apresenta melhores desempenhos que o modelo LBSB sob tráfego moderado ou intenso. Em [7], é proposto um novo algoritmo de carga balanceada onde as exigências computacionais não são tão elevadas, conseguindo igualmente um bom desempenho em diversas condições de tráfego e distribuição de carga pelas células. Como tanto o modelo de tráfego como o modelo de teletráfego são muito simples, este trabalho não é adequado para as actuais redes de telecomunicações. Além disso, este modelo foi desenhado para apenas uma célula em particular e não para toda a rede.

No trabalho de Lindsay-Stewart *et. al.* [18], também direccionado para redes bidimensionais, são propostos dois modelos para descrever a partilha dinâmica de canais entre células. Ambos os modelos utilizam um processo de Poisson homogéneo para descrever o processo de chegadas e partidas de móveis das células. As células ocupadas têm diferentes conjuntos de canais, cada uma com uma dada taxa de bloqueio.

Num dos modelos propostos em [18] é assumido o uso mutuamente exclusivo dos canais para empréstimo, que é atingido à custa de uma arquitectura de rede centralizada que apura que canais estão ocupados e quais estão livres. Assume-se que uma célula congestionada pode usar um canal numa célula vizinha sempre que algum canal estiver

livre, que uma célula que empresta não pode pedir canais emprestados e que existe um número máximo de canais que podem ser emprestados. No outro modelo, cada célula é autónoma e responsável por decidir quais são os canais livres e quais são os ocupados, pelo que requer que cada célula tenha um mecanismo de controlo. Neste modelo pressupõe-se que existe um conjunto pré-estabelecido de canais a emprestar, que poderá ser utilizado apenas quando não existem mais canais disponíveis. Estas estratégias também foram construídas para apenas uma célula da rede e apresentam modelos de tráfego e teletráfego bastante simples.

Enquanto a motivação por detrás de todas as estratégias de alocação de recursos é uma melhor utilização dos recursos disponíveis com conseqüente redução da probabilidade de bloqueio de cada célula, poucos autores lidam com o problema de não uniformidade de tráfego em diferentes células, o que pode originar grandes perturbações no desempenho da rede. Uma excepção é o trabalho de Ule e Boucherie [23], que apresenta uma estratégia de empréstimo para o cenário de auto-estrada direccionado para redes GSM. No entanto, o modelo de tráfego é um modelo de fluido o que é limitativo, uma vez que é o estado global da rede que é tido em conta e não a contribuição individual do movimento do utilizador. O processo de entradas na rede é definido por um processo Poisson não homogéneo e para avaliação da estratégia de empréstimo é efectuada a predição do tráfego localmente e a curto prazo. Este modelo, baseado na alocação dinâmica de canais, é sustentado na correcta estimação do estado da rede e na correcta previsão do movimento de tráfego. Desta forma, embora o modelo de empréstimo de canais seja bastante eficaz, não está concebido para acompanhar o movimento dos utilizadores ao longo da rede. O modelo de teletráfego proposto apenas considera uma classe de tráfego. A principal conclusão da estratégia considerada é que o pedido de empréstimo deve ser direccionado para a célula que se encontra do lado com menor declive do pico de tráfego.

1.4 Objectivos e metodologia

Para suportar as características de teletráfego das futuras redes sem fios, nomeadamente diferentes classes de tráfego com diferentes requisitos de largura de banda, são necessárias

predições a curto prazo e medidas de controlo baseadas em leituras do teletráfego. Para atingir este objectivo, são necessárias estratégias apropriadas de alocação de recursos e partilha de largura de banda, combinadas com algoritmos de controlo de admissão de chamadas [2]. Um bom modelo terá de ser capaz de prever o estado da rede no curto prazo, antecipando possíveis congestionamentos, de forma a tomar medidas de controlo que assegurem uma eficiente utilização dos recursos disponíveis e garantam a qualidade de serviço pretendida. A qualidade de serviço será avaliada através das probabilidades de bloqueio de chamadas. Desta forma, a garantia da manutenção da qualidade de serviço estipulada pelo operador da rede móvel será alcançada através da manutenção das probabilidades de bloqueio abaixo de um nível previamente estabelecido.

O objectivo desta dissertação é propor um modelo de partilha de largura banda para prever o estado da rede e tomar medidas correctivas, para responder a alterações significativas dos padrões de qualidade do serviço prestado pela rede de telecomunicações. Este modelo é orientado para lidar com o problema de ocorrência de períodos de congestão, tais como os que ocorrem em horas de ponta.

Para atingir este objectivo são necessários resultados de desempenho da rede, tais como, a probabilidade de bloqueio de uma chamada e a capacidade requerida numa célula num intervalo curto de tempo. Além disso, os modelos deverão basear-se no menor número de parâmetros possível para que, através das observações da rede em intervalos curtos de tempo, se possa atingir uma rápida e eficaz estimacão da evoluçãõ do estado da rede e se possam tomar medidas efectivas de controlo.

Trata-se de um modelo direccionado para as redes de telecomunicações sem fios multimédia e baseia-se num modelo de tráfego proposto por Antunes, Pacheco e Rocha [3]. Este modelo integra os aspectos mais relevantes quer de teletráfego quer de mobilidade dos utilizadores. Em relação à mobilidade, é considerado o cenário de auto-estrada, onde a mobilidade do utilizador tem características particulares, tais como, direcção determinística e pequenas variações de velocidade. Em relação às exigências de teletráfego, é considerada a distinção entre várias classes de teletráfego, com diferentes necessidades de largura de banda. Além disso, o modelo terá em conta não só os móveis activos na rede (aqueles que se encontram a realizar uma ligação e que realmente ocupam largura de banda), mas

também os móveis inactivos (aqueles que não se encontram a realizar chamadas mas que futuramente poderão ficar activos). A consideração dos móveis inactivos permite melhorar a modelação da mobilidade e como tal também terá uma importância fulcral na obtenção de estimativas precisas do estado da rede.

Este modelo de partilha de largura de banda foi construído para lidar com períodos de congestão, acompanhando o pico de tráfego quando este se desloca ao longo da auto-estrada, contrariamente ao que acontece nos modelos descritos na secção anterior, que apenas centram a análise numa célula particular. Além de uma rápida previsão da evolução do estado da rede, são tomadas medidas de controlo para evitar o congestionamento das células. Nomeadamente, é implementada uma estratégia de empréstimo que permite que células menos congestionadas emprestem largura de banda às células que se encontram bloqueadas, possibilitando desta forma uma resposta célere às alterações do estado da rede mediante uma rápida e eficiente utilização dos recursos disponíveis.

O empréstimo entre células consiste num esquema de empréstimo composto por duas fases distintas: na primeira fase, é avaliada a construção do cluster de células, que não é mais do que o conjunto de células com permissão para realizar empréstimos de largura de banda entre si. Para isso, são recolhidas periodicamente informações do estado da rede e calculadas estimativas da largura de banda necessária em cada célula. Na segunda fase, é aplicado um algoritmo de empréstimo/devolução de largura de banda, de fácil aplicação em tempo real, onde se determinam e efectuam os pedidos de empréstimo. Esta fase é dividida em duas etapas. Na primeira etapa, é actualizada a capacidade efectiva de serviço, calculada a capacidade disponível em cada célula e, através de um algoritmo, são determinados os pedidos de largura de banda entre células. Na segunda etapa, o sucesso do empréstimo é avaliado. São calculadas as devoluções de largura de banda por parte das células que não efectuaram um pedido de empréstimo e é actualizada a largura de banda emprestada entre células.

Toda esta estratégia de empréstimo é realizada num reduzido intervalo de tempo, possibilitando prever antecipadamente a ocorrência dos picos de tráfego e realizando uma eficiente gestão da largura de banda disponível.

1.5 Organização da dissertação

Descrevemos agora o conteúdo dos restantes capítulos desta dissertação.

No Capítulo 2, apresentamos a generalização do modelo de tráfego proposto por Antunes, Pacheco e Rocha [3], para uma rede sem fios de banda larga em cenário de auto-estrada, para o caso em que o processo de entradas na auto-estrada é não homogéneo. Neste modelo de tráfego a mobilidade e os aspectos de teletráfego são considerados de forma integrada, permitindo várias classes de teletráfego com requerimentos variáveis de largura de banda.

No Capítulo 3, apresentamos o modelo adaptativo de partilha de largura de banda. Este algoritmo é composto por duas fases. Na primeira fase descrevemos o algoritmo que define o conjunto de células autorizadas a realizar empréstimos (cluster) e na segunda fase apresentamos a estratégia de empréstimo entre estas células.

No Capítulo 4, são apresentadas medidas de desempenho da rede. Começamos por mostrar que a densidade espacial do número de móveis na auto-estrada é um processo de Poisson não homogéneo. Este facto é usado para calcular boas estimativas do estado da rede necessárias para um adequado desempenho da estratégia de empréstimo. Em seguida, são derivados resultados de desempenho da rede, tais como, a distribuição condicional do número de chamadas de handoff e de novas chamadas numa célula. Finalmente, são obtidos resultados analíticos que mostram o impacto do número de móveis na célula e da dimensão das células no número de handoffs e de novas chamadas, destacando-se a influência dos móveis inactivos na previsão do estado da rede.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados de simulação obtidos para aferir a qualidade do modelo adaptativo de partilha de largura de banda proposto e validar os resultados analíticos.

Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho, assim como linhas orientadoras do trabalho futuro.

Capítulo 2

O modelo de auto-estrada

Neste capítulo iremos apresentar um modelo de tráfego para redes sem fios de banda larga para um cenário de auto-estrada. Este modelo é obtido por extensão do modelo de Antunes, Pacheco e Rocha [3], considerando que o processo de entradas de móveis na auto-estrada é um processo de Poisson não homogéneo.

O modelo usado é descrito na Secção 2.2 após a apresentação, na Secção 2.1, de alguns conceitos usados ao longo da tese. Após a apresentação do modelo, são apresentados resultados relativos ao número de móveis em cada célula, na Secção 2.3, e aos processos de handoff, na Secção 2.4.

2.1 Preliminares

Nesta secção introduziremos alguns conceitos que irão ser utilizados ao longo da dissertação. Os conceitos apresentados servem essencialmente para descrever o processo de Poisson. Antes de definirmos o processo de Poisson e suas principais propriedades, comecemos por introduzir alguns conceitos sobre processos pontuais.

Um espaço de probabilidades é um terno (Ω, \mathcal{F}, P) , onde Ω é um conjunto, \mathcal{F} uma σ -álgebra de subconjuntos de Ω e P uma medida de probabilidade.

Definição 2.1 *Uma variável aleatória real definida no espaço de probabilidades (Ω, \mathcal{F}, P) é uma função X de Ω para \mathbb{R} que é mensurável no sentido que $\{w : X(w) \leq x\}$ pertence*

a \mathcal{F} para todo o $x \in \mathbb{R}$.

Definamos agora um processo estocástico.

Definição 2.2 *Um processo estocástico com espaço de parâmetros S definido no espaço de probabilidades (Ω, \mathcal{F}, P) é uma função parametrizada de variáveis aleatórias $\{X(t), t \in S\}$ reais definidas em (Ω, \mathcal{F}, P) .*

Um processo estocástico pode ser interpretado como uma função $S \times \Omega$ em \mathbb{R} , onde a cada (t, ω) corresponde $X(t, \omega)$. Normalmente o parâmetro t representa o tempo. O conjunto de índices onde t varia pode ser discreto ou contínuo. Caso $S = [0, \infty)$ ou $S = [t, T]$, $t < T$, o processo estocástico $\{X(t), t \geq 0\}$ diz-se um processo estocástico em tempo contínuo. Designaremos por X o processo estocástico $\{X(t), t \geq 0\}$, ou seja, $X = \{X(t), t \geq 0\}$.

Seja \mathbb{E} um espaço Euclideano e seja \mathcal{E} uma σ -álgebra em \mathbb{E} . Suponha-se que x_1, x_2, \dots, x_n são localizações de pontos (ou unidades de massa) em \mathbb{E} . Pode existir mais do que um ponto numa localização. Estes pontos são descritos pela medida de contagem ν em \mathbb{E} definida por

$$\nu(A) = \sum_{j=1}^n I_A(x_j), \quad A \in \mathcal{E}, \quad (2.1)$$

onde $I_A(x_j)$ representa a função indicatriz, ou seja, $I_A(x_j) = 1$ se $x_j \in A$ e 0 caso contrário, e $\nu(A)$ representa o número de pontos em A . Seja \mathbb{M} o conjunto de todas estas medidas de contagem em \mathbb{E} que são finitas em conjuntos compactos. Dote-se \mathbb{M} com uma σ -álgebra \mathcal{M} em \mathbb{M} gerada pelos conjuntos $\{\nu \in \mathbb{M} : \nu(A) = n\}$, para $A \in \mathcal{E}$ e $n \in \mathbb{N}$.

Proposição 2.3 *Um processo pontual N em \mathbb{E} é uma aplicação mensurável de um espaço de probabilidade (Ω, \mathcal{F}, P) no espaço $(\mathbb{M}, \mathcal{M})$. A quantidade $N(A)$ é o número de pontos num boreliano A . Representamos N como*

$$N(A) = \sum_j I_A(X_j), \quad A \in \mathcal{E} \quad (2.2)$$

onde os X_j denotam a localização dos pontos de N .

Consideremos $\mathbb{E} = \mathbb{R}^+$, para simplificar a exposição e por ser esse o espaço de estados onde iremos trabalhar.

Um processo pontual N diz-se *simples* se $P(N(\{x\}) \leq 1, \text{ para todo } x \in \mathbb{R}^+) = 1$. Ao longo de toda a dissertação consideraremos apenas processos pontuais simples.

Quando um subconjunto $A \in \mathcal{E}$ é expresso pela união de subconjuntos A_1, A_2, \dots, A_n , $A = \cup_{j=1}^n A_j$, disjuntos dois a dois, ou seja, $A_i \cap A_j = \emptyset$, para $i \neq j$, então,

$$N(A) = N\left(\bigcup_{j=1}^n A_j\right) = \sum_{j=1}^n N(A_j). \quad (2.3)$$

A distribuição de probabilidade de um processo pontual N é determinada pelas suas funções de probabilidade conjuntas em número finito

$$P(N(A_1) = n_1, N(A_2) = n_2, \dots, N(A_n) = n_k) \quad (2.4)$$

para $k \in \mathbb{N}$, $A_1, A_2, \dots, A_k \in \mathcal{E}$ e $n_1, n_2, \dots, n_k \in \mathbb{N}_0$.

Seja $N(u) = N((0, u])$ para $u \in \mathbb{R}^+$. Para $s \geq 0$ e $t \geq 0$, $N(t+s) - N(t)$ representa o incremento do processo no intervalo $(t, t+s]$.

Definição 2.4 *Um processo pontual diz-se estacionário se o número de pontos que ocorrem num dado intervalo de tempo depende apenas do tamanho do intervalo, ou seja, $N(t)$ é estacionário se $N(t+s) - N(t)$ tem a mesma distribuição para todo o t .*

Definição 2.5 *Um processo pontual tem incrementos independentes se os incrementos em intervalos de tempo disjuntos são independentes, ou seja, o processo $N(t)$ tem incrementos independentes se para qualquer $n \in \mathbb{N}$ e quaisquer $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n$, as variáveis aleatórias*

$$N(t_j) - N(t_{j-1}), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.5)$$

são independentes.

Usualmente os processos pontuais são definidos através da medida média que se representa por $\mu(A) = E[N(A)]$, $A \in \mathcal{E}$. Iremos introduzir agora o processo de Poisson, segundo os livros de Kingman [14] e Kulkarni [15].

Proposição 2.6 *Um processo pontual N em \mathbb{R}^+ é um processo de Poisson com medida média μ se possui incrementos independentes e, para cada $A \in \mathcal{E}$, o número de pontos em A , $N(A)$, é uma variável aleatória de Poisson com média $\mu(A)$, i.e.,*

$$P(N(A) = n) = \frac{e^{-\mu(A)} \mu(A)^n}{n!}, \quad n \in \mathbb{N}_0. \quad (2.6)$$

A medida média é, nos casos mais interessantes, caracterizada por uma taxa ou intensidade. Esta é uma função não negativa $\lambda(x)$ em \mathbb{R}^+ , em termos da qual, a medida média $\mu(A)$, é obtida por integração de $\lambda(x)$, ou seja,

$$\mu(A) = \int_A \lambda(x) dx \quad (2.7)$$

onde $\lambda(x)$ é a taxa de N no ponto x . Se λ é constante, então

$$\mu(A) = \lambda|A|$$

com $|A|$ denotando a medida de Lebesgue e neste caso o processo de Poisson diz-se homogêneo.

O resultado seguinte estabelece que a soma de variáveis aleatórias de Poisson possui ainda distribuição de Poisson, com taxa igual à soma das taxas das variáveis aleatórias.

Proposição 2.7 *Sejam X_1, X_2, \dots, X_n , $n \in \mathbb{N}$, variáveis aleatórias independentes tais que X_j tem distribuição de Poisson com taxa λ_j , para cada j . Então*

$$S = \sum_{j=1}^n X_j \sim \text{Poisson} \left(\sum_{j=1}^n \lambda_j \right). \quad (2.8)$$

O resultado análogo estabelece que a soma de processos de Poisson independentes ainda é um processo de Poisson. Designemos, de agora em diante, o processo de Poisson com taxa $\lambda(t)$ por $PP(\lambda(t))$.

Proposição 2.8 *Sejam N_1, N_2, \dots, N_n , $n \in \mathbb{N}$, processos de Poisson independentes em \mathbb{R}^+ , onde N_j tem taxa $\lambda_j(t)$, para cada j . Então, o processo N com*

$$N(t) = N_1(t) + N_2(t) + \dots + N_n(t), \quad (2.9)$$

é um PP $\left(\sum_{j=1}^n \lambda_j(t)\right)$.

Além disso, um evento do processo N que ocorre no instante t é originário do processo N_j com probabilidade $\lambda_j(t)/\sum_{k=1}^n \lambda_k(t)$, independentemente dos outros eventos.

O resultado seguinte estabelece que a filtragem independente de Bernoulli de variáveis aleatórias de Poisson tem como resultado variáveis aleatórias independentes ainda com distribuição de Poisson.

Proposição 2.9 *Se $X \sim Poisson(\lambda)$ e*

$$[X_1, X_2, \dots, X_n] | X = m \sim Multinomial(m, p_1, p_2, \dots, p_n) \quad (2.10)$$

para todo o m , então as variáveis aleatórias X_1, X_2, \dots, X_n são independentes e

$$X_j \sim Poisson(\lambda p_j), \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (2.11)$$

Consideremos agora processos pontuais com marcas. Suponhamos que N é um processo pontual em \mathbb{R}^+ . Assumamos que cada ponto X_n de N é associado com uma quantidade aleatória Z_n (a marca de X_n) tomando valores em \mathbb{N} . A distribuição de Z_n pode depender de X_n mas não de outros pontos de N , e os Z_n para diferentes X_n são independentes. Seja $M(A \times B)$ o número de pontos de N em A , $A \in \mathcal{E}$, que recebem marcas em B , $B \subseteq \mathbb{N}$. Ou seja,

$$M(A \times B) = \sum_n I_{A \times B}((X_n, Z_n)).$$

O processo M em $\mathbb{R} \times \mathbb{N}$ é um processo pontual marcado associado com N , e as quantidades aleatórias Z_n são marcas dependentes de N .

Para uma melhor clarificação, os resultados seguintes serão apresentados em termos de clientes que chegam à rede. Suponha-se que os clientes chegam à rede de acordo com um processo de Poisson não homogêneo em \mathbb{R}^+ com taxa $\lambda(t)$, $t \geq 0$. Para uma consulta mais detalhada destes resultados, veja-se, e.g., Kingman [14].

Teorema 2.10 *Suponha-se que um cliente que chega ao sistema no instante s é marcado como sendo do tipo j com probabilidade $p_j(s)$, $j = 1, 2, \dots, n$, independentemente da forma*

como outros clientes são marcados. Para $t \geq 0$ e $j = 1, 2, \dots, n$, seja $N_j(t)$ o número de clientes do tipo j que chegam até ao instante t .

Então, os processos pontuais N_j , $j = 1, 2, \dots, n$, são processos de Poisson não homogêneos independentes com medida média

$$E[N_j(t)] = \int_0^t p_j(s)\lambda(s)ds.$$

Assim, para todo o $t \geq 0$, as variáveis aleatórias $N_j(t)$, $j = 1, 2, \dots, n$, são independentes e

$$N_j(t) \sim \text{Poisson} \left(\int_0^t p_j(s)\lambda(s)ds \right).$$

O resultado seguinte confirma que colorações de processos de Poisson sujeitos a translações e filtrações são também processos de Poisson.

Teorema 2.11 *Suponha-se que um cliente que chega ao sistema no instante s é marcado até ao instante t ($t \geq s$) como sendo do tipo j com probabilidade $p_j^*(t-s)$, $j = 1, 2, \dots, n$, independentemente da forma como os outros clientes são marcados.*

Para $t \geq 0$ e $j = 1, 2, \dots, n$, seja $N_j(t)$ o número de clientes que são marcados com o tipo j até ao instante t . Então, os processos N_j , $j = 1, 2, \dots, n$, são processos de Poisson não homogêneos independentes com medida média

$$E[N_j(t)] = \int_0^t p_j^*(t-s)\lambda(s)ds = \int_0^t p_j^*(s)\lambda(t-s)ds, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

2.2 Descrição do modelo

O modelo que apresentamos nesta secção integra os aspectos de mobilidade e teletráfego, permitindo múltiplas classes de teletráfego.

Assumimos que o tráfego apenas se desloca num sentido, da esquerda para a direita, mas o modelo pode ser facilmente estendido a uma auto-estrada com dois sentidos. Consideremos um troço de auto-estrada com sentido único dividido em segmentos, onde cada segmento corresponde a uma célula com a sua própria estação base e cujo comprimento

total é de L (Km). A célula i ($1 \leq i \leq m$) compreende o intervalo $(l_{i-1}, l_i]$ da auto-estrada, com $0 = l_0 < l_1 < \dots < l_m = L$, cuja única entrada se situa na célula 1, nos $l_0 = 0$ (Km) e a única saída na célula m , nos $l_m = L$ (Km).

Como as diferentes classes de tráfego correspondem a diferentes aplicações (como por exemplo, voz, dados e vídeo), as chamadas das diferentes classes de tráfego podem diferir quer na qualidade de serviço exigida quer no ritmo de transmissão necessário para a respectiva realização. Todas estas características de teletráfego podem ser representadas por um único valor - a capacidade equivalente por classe de tráfego (veja-se, e.g. [11], para uma descrição mais pormenorizada de capacidade equivalente).

O processo de teletráfego do móvel r é definido pelo processo (C_r, B_r) , onde C_r representa o estado da chamada e B_r a capacidade equivalente da chamada, e assume-se que

$$\{(C_r, B_r), r \geq 1\} \stackrel{iid}{\sim} (C, B). \quad (2.12)$$

onde (C, B) é um processo de fluído Markov modulado (PFMM) (veja-se, e.g., [21]).

A consideração de um PFMM permite a existência de diferentes tipos de chamada em diferentes classes de tráfego, sendo o estado de chamada de um móvel na auto-estrada governado por uma CMTC irreduzível, C , que modela a taxa à qual o fluído é gerado. Assumimos que C possui espaço de estados $A = A_0 \cup A_1$, onde A_0 representa o conjunto de estados inactivos (sem chamada), A_1 representa o conjunto dos estados activos associados a n classes de tráfego e $A_0 \cap A_1 = \emptyset$. A possibilidade de existir mais do que um estado inactivo permite que os períodos de inactividade sejam não exponenciais. O processo de fluído tem taxa $B(t) = b_{C(t)}$, onde b_j é a capacidade equivalente de um móvel no estado j , sendo que $b_j = 0$, para $j \in A_0$.

Seja N o processo (de contagem) de chegadas de móveis à auto-estrada, o qual se considera ser um processo de Poisson não homogéneo de taxa $\lambda(t)$. Assumimos que os móveis entram na auto-estrada com uma velocidade definida por uma distribuição de probabilidade e que não existe perda de tempo quando um móvel ultrapassa outro. Seja V_r uma variável aleatória contínua com distribuição conhecida que representa a velocidade do móvel r , tal que

$$\{V_r, r \geq 1\} \stackrel{iid}{\sim} V \quad (2.13)$$

e denota-se por F (f) a função distribuição cumulativa (função densidade de probabilidade) de V . Assume-se que $E[V^{-1}]$ é finito.

Assume-se ainda que os estados de chamada dos móveis e as respectivas velocidades são independentes

$$\{C_r, r \geq 1\} \perp \{V_r, r \geq 1\}. \quad (2.14)$$

Finalmente, para $t \geq 0$, seja

$$q_j(t) = P(C(t) = j), \quad q_{jk}(t) = P(C(t) = k | C(0) = j), \quad j, k \in A. \quad (2.15)$$

2.3 Número de móveis nas células

Nesta subsecção iremos derivar a distribuição do número de móveis em cada célula, por estado de chamada, para o modelo apresentado na secção anterior. Os resultados derivados nesta secção generalizam os resultados derivados por Antunes, Pacheco e Rocha [3] para o caso em que o processo de entradas de móveis na auto-estrada é um processo de Poisson não homogéneo.

Para $t \geq 0$, $1 \leq i \leq m$ e $j \in A$, seja $Y_i^j(t)$ o número de móveis que no instante t se encontram na célula i com estado de chamada j . De modo análogo, para $A^* \subseteq A$, $Y_i^{A^*}(t)$ denota o número de móveis que no instante t se encontram na célula i com estado de chamada pertencente a A^* .

Teorema 2.12 *Para $t \geq 0$, as variáveis aleatórias $Y_i^j(t)$, $1 \leq i \leq m$ e $j \in A$, são independentes e*

$$Y_i^j(t) \sim \text{Poisson} \left(\int_0^t \int_{\frac{l_{i-1}}{t-s}}^{\frac{l_i}{t-s}} \lambda(s) f(v) q_j(t-s) dv ds \right). \quad (2.16)$$

Demonstração Consideremos $t \geq 0$ fixo. Considere-se que cada móvel é marcado com o tipo (i, j) independentemente dos restantes móveis se no instante t se encontrar na célula i com estado de chamada j . Assim, se o móvel entra na auto-estrada no instante $s \leq t$, ele estará localizado na célula i no instante t se a sua velocidade, V^* , for tal que

$l_{i-1} < (t-s)V^* \leq l_i$, independentemente de outros móveis. Desta forma, a probabilidade de um móvel se encontrar na célula i com estado chamada j no instante t , é dada por

$$\begin{aligned} p_i^j(s) &= P(l_{i-1} < (t-s)V \leq l_i, C(t-s) = j) \\ &= P\left(\frac{l_{i-1}}{t-s} < V \leq \frac{l_i}{t-s}\right) P(C(t-s) = j) \\ &= \left[F\left(\frac{l_i}{t-s}\right) - F\left(\frac{l_{i-1}}{t-s}\right)\right] q_j(t-s). \end{aligned}$$

Assim, para $1 \leq i \leq m$ e $j \in A$, $Y_i^j(t)$ será o número de móveis do tipo (i, j) marcados até ao instante t e, pelo Teorema 2.10, as variáveis aleatórias $Y_i^j(t)$ são variáveis aleatórias de Poisson independentes com médias

$$\begin{aligned} E[Y_i^j(t)] &= \int_0^t p_i^j(s) \lambda(s) ds \\ &= \int_0^t \left[F\left(\frac{l_i}{t-s}\right) - F\left(\frac{l_{i-1}}{t-s}\right)\right] q_j(t-s) \lambda(s) ds \\ &= \int_0^t \int_{\frac{l_{i-1}}{t-s}}^{\frac{l_i}{t-s}} f(v) q_j(t-s) \lambda(s) dv ds. \quad \blacksquare \end{aligned}$$

Este resultado mostra que o número de móveis em cada célula e em cada estado de chamada no instante t são variáveis aleatórias de Poisson independentes.

O número total de móveis activos na célula i , $Y_i^{A_1}(t)$, será dado pela soma do número de móveis com estado de chamada activo, ou seja,

$$Y_i^{A_1}(t) = \sum_{j \in A_1} Y_i^j(t) \quad (2.17)$$

e o número total de móveis inactivos na célula i , $Y_i^{A_0}(t)$, é dado por

$$Y_i^{A_0}(t) = \sum_{j \in A_0} Y_i^j(t). \quad (2.18)$$

Desta forma, as variáveis aleatórias $Y_i^{A_0}(t)$ e $Y_i^{A_1}(t)$ são variáveis aleatórias de Poisson independentes, com médias dadas por

$$E[Y_i^{A_k}(t)] = \int_0^t \int_{\frac{l_{i-1}}{t-s}}^{\frac{l_i}{t-s}} f(v) \lambda(s) q_{A_k}(t-s) dv ds, \quad k = 0, 1 \quad (2.19)$$

onde $q_{A_k}(u) = \sum_{j \in A_k} q_j(u)$, $k = 0, 1$.

Estes resultados mostram que o número de móveis activos e o número de móveis inactivos em diferentes células no instante t são independentes e têm distribuição de Poisson.

Finalmente, os números de móveis nas diferentes células da auto-estrada, $Y_i^A(t) = \sum_{j \in A} Y_i^j(t)$, $1 \leq i \leq m$, são independentes e têm distribuição de Poisson com média

$$E[Y_i^A(t)] = \int_0^t \int_{\frac{l_{i-1}}{t-s}}^{\frac{l_i}{t-s}} f(v)\lambda(s)dv ds. \quad (2.20)$$

2.4 Processos de handoff

Derivemos agora a distribuição do número de móveis que efectuem handoff para a célula i no intervalo $(0, t]$, para cada estado de chamada.

Para $t \geq 0$, $2 \leq i \leq m$ e $j \in A$, seja $H_i^j(t)$ o número de móveis que transitam da célula $i - 1$ para a célula i com estado de chamada j durante o intervalo $(0, t]$. De modo análogo, para $A^* \subseteq A$, $H_i^{A^*}(t)$ denota o número de móveis que transitam da célula $i - 1$ para a célula i com estado de chamada pertencente a A^* durante o intervalo $(0, t]$.

Teorema 2.13 *Para $2 \leq i \leq m$, os processos estocásticos $H_i^j(t)$, $j \in A$, são processos de Poisson não homogéneos independentes com medidas médias*

$$E[H_i^j(t)] = \int_0^t \int_{\frac{l_{i-1}}{t-s}}^{\infty} \lambda(s)f(v)q_j \left(\frac{l_{i-1}}{v} \right) dv ds. \quad (2.21)$$

Em particular, para $t \geq 0$ fixo, $H_i^j(t)$, $j \in A$, são variáveis aleatórias de Poisson independentes com médias dadas por (2.21).

Demonstração Se $2 \leq i \leq m$, então um móvel transita da célula $i - 1$ para a célula i com estado de chamada j até u unidades de tempo após entrar na auto-estrada, com probabilidade

$$\begin{aligned} h_i^j(u) &= P \left(uV > l_{i-1}, C \left(\frac{l_{i-1}}{V} \right) = j \right) \\ &= \int_{\frac{l_{i-1}}{u}}^{\infty} P \left(C \left(\frac{l_{i-1}}{v} \right) = j \right) f(v)dv \\ &= \int_{\frac{l_{i-1}}{u}}^{\infty} f(v)q_j \left(\frac{l_{i-1}}{v} \right) dv. \end{aligned}$$

Para $t \geq 0$ e $2 \leq i \leq m$ fixos, considere-se que um móvel é do tipo j se chega à auto-estrada num instante inferior ou igual a t e sai da célula $i - 1$ com estado de chamada j até ao instante t . Desta forma, $H_i^j(t)$, $t \geq 0$, representa o número de móveis marcados com o tipo j até ao instante t , e a probabilidade de um móvel que chega no instante s , $s \leq t$, ser marcado com tipo j será dada por $h_i^j(t - s)$. Pelo Teorema 2.11, concluímos que $H_i^j(t)$, $j \in A$, são processos Poisson não homogéneos independentes com medidas médias

$$\begin{aligned} E[H_i^j(t)] &= \int_0^t h_i^j(t - s) \lambda(s) ds \\ &= \int_0^t \int_{\frac{l_{i-1}}{t-s}}^{\infty} f(v) q_j \left(\frac{l_{i-1}}{v} \right) \lambda(s) dv ds. \end{aligned}$$

Desta forma, $H_i^j(t)$, $j \in A$, são variáveis aleatórias de Poisson independentes com médias dadas pela expressão anterior. ■

Este resultado mostra que os processos de handoff de móveis numa célula da auto-estrada por estado de chamada, são processos de Poisson não homogéneos independentes.

O número total de móveis que realizam handoff da célula $i - 1$ para a célula i , $H_i^{A_1}(t)$, é dado pela soma do número de handoffs nos diferentes estados de chamada activos, ou seja,

$$H_i^{A_1}(t) = \sum_{j \in A_1} H_i^j(t), \quad (2.22)$$

e o número total de móveis inactivos que transitam da célula $i - 1$ para a célula i , $H_i^{A_0}(t)$, é dado por

$$H_i^{A_0}(t) = \sum_{j \in A_0} H_i^j(t). \quad (2.23)$$

Desta forma, os processos $H_i^{A_1}$ e $H_i^{A_0}$, são processos de Poisson não homogéneos independentes, com medidas médias dadas por

$$E[H_i^{A_k}(t)] = \int_0^t \int_{\frac{l_{i-1}}{t-s}}^{\infty} f(v) \lambda(s) q_{A_k} \left(\frac{l_{i-1}}{v} \right) dv ds, \quad k = 0, 1.$$

Estes resultados mostram que o processo de handoff de móveis para a célula i e o número de móveis inactivos que transitam para a célula i são processos de Poisson não homogéneos independentes. Além disso, como o número total de móveis que transitam da célula $i - 1$ para a célula i , $H_i^A(t)$, é dado por

$$H_i^A(t) = \sum_{j \in A} H_i^j(t) \quad (2.24)$$

o processo de entrada de móveis na célula i da auto-estrada é ainda um processo de Poisson não homogêneo, com medida média

$$E[H_i^A(t)] = \int_0^t \int_{\frac{i-1}{t-s}}^{\infty} f(v)\lambda(s)dvds.$$

Capítulo 3

O modelo adaptativo de partilha de largura de banda

Numa rede sem fios, a largura de banda é o recurso mais escasso e mais precioso em toda a rede. Para que esse recurso seja usado de forma eficiente deve existir uma gestão adequada da largura de banda.

Cada célula tem atribuída uma certa largura de banda fixa. Durante os períodos de congestão, como os que ocorrem em horas de ponta, a taxa de entradas de móveis na auto-estrada não é constante, o que provoca picos de carga. Durante estes picos de carga, a capacidade inicial atribuída a cada célula pode ser insuficiente para manter a qualidade do serviço estabelecida pelo fornecedor do serviço móvel, devendo a rede implementada ser suficientemente flexível para contornar este tipo de situações. Entre as estratégias adoptadas para gerir eficientemente a largura de banda durante os períodos de congestão destacam-se as estratégias de empréstimo de largura de banda entre células. Estas estratégias permitem que células que não se encontrem congestionadas redireccionem a largura de banda disponível para as células que se encontrem nesta situação. Esta partilha de largura de banda é uma forma rápida e eficaz para combater o excesso de teletráfego, e é uma das formas de as células obterem largura de banda extra para fazer face ao pico de carga.

O modelo aqui apresentado é uma estratégia de empréstimo de largura de banda

entre células e a sua implementação é dividida em duas fases. Em primeiro lugar, periodicamente e através da monitorização da rede, é estimada a largura de banda necessária em cada célula após um curto intervalo de tempo, determinando o conjunto de células consecutivas que podem realizar empréstimos, denominado de **cluster**. Se o cluster for criado, avança-se para a segunda fase da estratégia de empréstimo, onde se implementa o algoritmo de empréstimo. Esta fase é dividida em duas etapas. Na primeira etapa, por intermédio da largura de banda estimada em cada célula e da capacidade disponível de cada célula, determinam-se os pedidos de empréstimo de largura de banda. Estes pedidos são endereçados para as células respectivas. Na segunda etapa, é avaliado o sucesso dos empréstimos e são actualizados os parâmetros relevantes. Ainda nesta fase, são determinadas as devoluções de largura de banda, às células que não efectuaram pedido de empréstimo. Trata-se de um algoritmo simples, facilmente aplicável em tempo real, necessitando apenas de uma correcta estimativa da capacidade requerida em cada célula.

Este capítulo encontra-se organizado da seguinte forma. Na Secção 3.1 apresentamos alguns pressupostos do modelo de partilha de largura de banda. Na Secção 3.2 começamos por caracterizar o cluster de células e descrever a sua função. Na Secção 3.3 definimos inicialmente a capacidade requerida em cada célula, necessária em toda a estratégia de empréstimo e, posteriormente, descrevemos como o cluster de células evolui ao longo da auto-estrada. Na Secção 3.4 descrevemos a estratégia de empréstimo de largura de banda entre células, introduzindo o algoritmo de empréstimo. Finalmente, na Secção 3.5 apresentamos alguns resultados que validam a estratégia de empréstimo proposta.

3.1 Preliminares

Começamos por introduzir alguns conceitos que facilitarão a exposição do modelo de partilha de largura de banda.

Apesar das funções de controlo de rádio não estarem associadas à BS, descreveremos a estratégia de empréstimo ao nível da BS, pelo que os empréstimos se dirão ser realizados entre células. Além disso, na introdução de alguns parâmetros, a quantidade de largura

de banda numa dada célula será definida pela capacidade da célula.

Apresentamos de seguida a justificação de alguns pressupostos utilizados no modelo de partilha de largura de banda. Numa rede celular, com os utilizadores a partilhar a mesma largura de banda na mesma célula, cada BS recebe interferências não só dos móveis que se encontram nessa célula, mas também dos móveis que se encontram nas células vizinhas. Desta forma, com o objectivo de diminuir as fontes de interferência nas comunicações móveis, assumimos que não mais do que duas células consecutivas podem realizar empréstimos simultaneamente, o que implicitamente significa que a distância de reutilização de frequências é de duas células.

Assumimos também que os pedidos de empréstimo apenas se poderão direccionar num único sentido, para a esquerda, sendo os empréstimos de largura de banda da célula da esquerda para a célula da direita, designando-se por isso de *empréstimo à direita*. Se os pedidos de empréstimo são direccionados para a direita, e logo os empréstimos de largura de banda para a esquerda, designamos por *empréstimo à esquerda*. Como tal, perante empréstimos à direita, se a célula i se encontra em défice de largura de banda e necessita de efectuar um empréstimo, apenas pode endossar o pedido à célula $i - 1$; se lhe é requisitado um empréstimo de largura de banda este apenas pode ter origem na célula $i + 1$. Para construção do algoritmo de empréstimo consideraremos que a direcção do empréstimo é à direita, visto que o empréstimo à esquerda é obtido de forma análoga. Posteriormente, no Capítulo 5, compararemos, através de simulação, ambas as direcções, procurando aferir qual a mais eficiente. A escolha pela estratégia de empréstimo à direita justifica-se pelo facto de se realizar empréstimos no sentido do movimento de tráfego, das células que já não estão afectadas pelo pico de tráfego para as células afectadas, evitando assim desguarnecer as células que irão receber o pico de tráfego.

Assumimos também que a diminuição da largura de banda na célula que a empresta terá que ser igual ao aumento de largura de banda na célula que a recebe. Quando uma célula deixa de pertencer ao cluster, toda a largura de banda que possua por empréstimo é devolvida e, sempre que um pedido de empréstimo é satisfeito, apenas a largura de banda necessária para satisfazer o pedido é emprestada. Os empréstimos de largura de banda

são a única forma da capacidade inicial atribuída às células sofrer alterações. Assumimos ainda que não existem restrições na quantidade de largura de banda que cada célula pode emprestar.

Finalmente, como a informação do estado da rede é actualizada em cada h unidades de tempo, assumimos que o intervalo de tempo h entre actualizações é escolhido de forma a que um móvel não possa realizar mais do que um handoff nesse intervalo de tempo. Trata-se de uma escolha sensível às súbitas alterações do estado da rede, ou seja, não é um intervalo muito grande que permita grandes variações no estado da rede, mas também não é um intervalo de tempo muito pequeno que origine uma sobrecarga no teletráfego de controlo da rede.

3.2 Caracterização do cluster

O cluster define qual o grupo de células que estão autorizadas a partilhar largura de banda entre si, pelo que apenas as células abrangidas pelo cluster podem efectuar empréstimos de largura de banda. Devido aos constrangimentos de rádio já referidos, o cluster é constituído apenas por três células, de forma a existir uma distância máxima de empréstimos de duas células.

Quando surge um pico de tráfego no troço da auto-estrada é criado um cluster abrangendo a última célula congestionada e as duas células imediatamente à sua esquerda. Por esta razão, o cluster só pode ser construído a partir da terceira célula do troço, inclusive.

Apenas em situações de tráfego homogéneo e perante a existência de várias células congestionadas, a escolha da célula na qual o cluster é inicialmente associado poderá ser importante para o desempenho da estratégia de empréstimo. Em situações de tráfego não homogéneo, esta atribuição não tem grande influência no desempenho da estratégia de empréstimo, pois com o aparecimento do pico de tráfego no início do troço de células, o cluster é criado nas três primeiras células, acompanhando este bloqueio até ao desaparecimento do pico de tráfego da rede. Assim, a escolha da célula mais próxima do fim do troço da auto-estrada para atribuição do cluster, torna-se numa hipótese simplificadora e

justifica-se no sentido de se pretender acompanhar o pico de tráfego que mais rapidamente abandona a auto-estrada, de forma a que mais rapidamente o cluster de células possa ser transferido para outro local do troço de células.

A representação do cluster, da direcção dos empréstimos e do troço da auto-estrada encontra-se descrita na Figura 3.1.

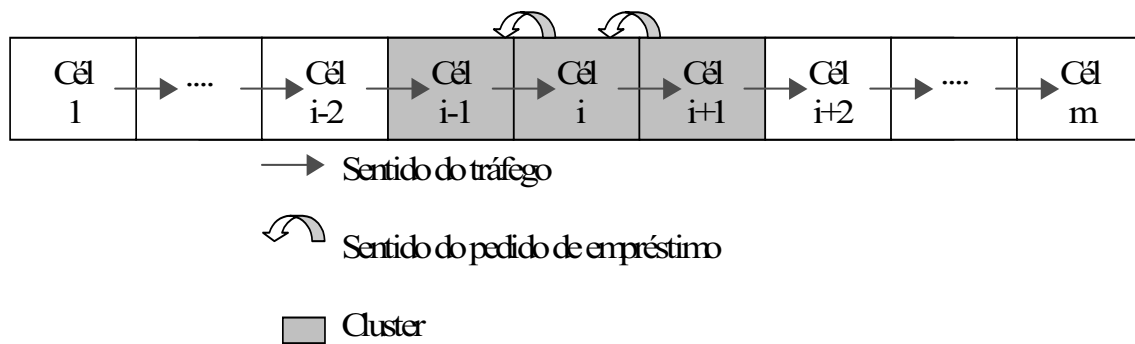


Figura 3.1: Representação de um cluster no troço de células em estudo.

A sua construção é suficientemente flexível para permitir o acompanhamento do pico de tráfego ao longo da auto-estrada, pois à medida que o tráfego se movimenta, o cluster de células acompanha esse movimento, permitindo que, durante o período de congestão, a estratégia de empréstimo se realize sobre as células congestionadas. O acompanhamento do pico de tráfego permite às células congestionadas recorrer a largura de banda extra para fazer face ao bloqueio. Em cada instante, apenas poderá existir um cluster no troço da auto-estrada, e quando este não existir as células não poderão partilhar largura de banda.

Periodicamente, em cada h unidades de tempo, e com base na informação sobre o

estado corrente da rede, realizam-se previsões do estado da rede para o próximo intervalo de h unidades de tempo. Consoante estas previsões, é avaliada a sustentabilidade da criação/existência de um cluster durante esse intervalo de tempo, no sentido de que: se ainda não existir nenhum cluster e houver necessidade, será criado um; caso já exista, avalia-se a conveniência da sua manutenção ou eliminação. Como a estratégia de empréstimo é implementada para intervalos de h unidades de tempo, considera-se, no que se segue, que o período k , $k \in \mathbb{N}_0$, representa o intervalo $[kh, (k+1)h)$. Uma variável definida no período k mantém sempre o mesmo valor nesse período.

O cluster de células no período k é designado por U_k . Dizemos que o cluster se encontra associado à célula i no período k se a última célula do cluster é a célula i . Nesse caso, representamos o cluster de células por $U_k = \{i-2, i-1, i\}$, para $i \geq 3$. Com base nas previsões do estado da rede, o cluster de células é actualizado em cada período, de forma a acompanhar o movimento do pico de tráfego.

3.3 Evolução do cluster

A construção/evolução do cluster é a primeira fase no desenvolvimento do modelo de partilha de largura de banda. Para a descrição desta etapa necessitamos de definir a capacidade requerida em cada célula e em cada instante. A estratégia apresentada desenrola-se em torno deste processo estocástico, quer através dos valores que toma no instante presente, quer pela necessidade de estimar o seu valor em instantes futuros. Esta estimativa pretende antever a evolução do pico de tráfego, permitindo a implementação de mecanismos de controlo que possibilitem a manutenção da qualidade de serviço das chamadas.

Para $1 \leq i \leq m$ e $k \geq 0$, seja C_i a capacidade inicial atribuída à célula i e $C_i^O(k)$ a capacidade ocupada na célula i no início do período k , ou seja,

$$C_i^O(k) = \sum_{j \in A_1} b_j Y_i^j(kh), \quad (3.1)$$

onde se relembra que $Y_i^j(kh)$ representa o número de móveis na célula i com estado de chamada j no início do período k e b_j a largura de banda ocupada por um móvel no estado j .

A estimativa da capacidade requerida na célula i no final do período k , condicional ao número de móveis em cada célula e em cada estado de teletráfego no início do período, é representada por $\widehat{C}_i^R(k)$. A capacidade estimada para o período k , $\widehat{C}_i(k)$, é dada pelo máximo entre a capacidade ocupada no início do período e a estimativa da capacidade requerida no final do período, ou seja

$$\widehat{C}_i(k) = \max \left\{ C_i^O(k), \widehat{C}_i^R(k) \right\}. \quad (3.2)$$

Após o cálculo da capacidade estimada, determina-se o conjunto de células congestionadas, ou seja, o conjunto das células cuja capacidade estimada para o período k exceda a sua capacidade inicial. Este conjunto é dado por $\{1 \leq i \leq m : \widehat{C}_i(k) > C_i\}$ e determina, em primeira instância, como o cluster de células evolui no próximo período.

Inicialmente distinguem-se dois casos: se não existe nenhum cluster no período $k - 1$ ou se neste período já existe um cluster de células. No primeiro caso, se não se prever congestionamento na rede, não é criado nenhum cluster no período k ; caso se preveja a existência de alguma célula congestionada no período k , o cluster é criado na célula congestionada mais próxima do fim da auto-estrada. No segundo caso, se o cluster de células já existe, este pode deixar de existir se o período de congestão terminar; manter-se na mesma célula se o pico de tráfego não se movimentar; avançar para a célula seguinte da auto-estrada caso o pico de tráfego se tenha movimentado; ou deslocar-se para outro local do troço de células.

O algoritmo de construção do cluster, que também é apresentado na Figura 3.2, pode ser descrito da seguinte forma:

Metodologia do cluster:

(A) **Não existe cluster** no período $k - 1$, $U_{k-1} = \emptyset$, então:

- Se nenhuma das células se encontra congestionada no período k , ou seja, se $\widehat{C}_i(k) \leq C_i$, $1 \leq i \leq m$, não haverá qualquer cluster neste período, $U_k = \emptyset$.

- Caso contrário, se $\widehat{C}_i(k) > C_i$, para alguma célula i , o cluster no período k será $U_k = \{l - 2, l - 1, l\}$, $l \geq 3$, com l denotando o índice máximo das células que se encontram congestionadas no período k .

(B) Se existe cluster no período $k - 1$, $U_{k-1} = \{i - 2, i - 1, i\}$, então:

- Se as células i e $i + 1$ não se encontrarem congestionadas no período k , ou seja, $\widehat{C}_i(k) \leq C_i$ e $\widehat{C}_{i+1}(k) \leq C_{i+1}$, então, caso alguma outra célula se encontre congestionada no início do período k , $U_k = \{l - 2, l - 1, l\}$, $l \geq 3$, com l denotando o índice máximo das células que se encontrem congestionadas no período; e $U_k = \emptyset$ caso contrário.
- Caso contrário, ou seja, se $\widehat{C}_i(k) > C_i$ e/ou $\widehat{C}_{i+1}(k) > C_{i+1}$, o cluster no período k será $U_k = \{l - 2, l - 1, l\}$ com l denotando o índice máximo das células i e $i + 1$ que se encontrem congestionadas no período.

Na Figura 3.2, apresenta-se um diagrama onde se observa o funcionamento do algoritmo de construção do cluster. Se o cluster de células é extinto de um período para outro, toda a largura de banda que as células possuem por empréstimo será devolvida.

3.4 Caracterização da estratégia de empréstimo

Após a construção do cluster, inicia-se a segunda fase da estratégia de empréstimo, onde se implementa o algoritmo de empréstimo. Este algoritmo consiste em duas etapas que iremos descrever pormenorizadamente. Cada uma destas etapas exige um curto intervalo de tempo para ser realizada.

Para se iniciar o algoritmo de empréstimo, é necessário que no início do período k tenha sido constituído o cluster de células. Assim, terão antes sido obtidas estimativas da largura de banda necessária em cada célula para o período k , conhecendo-se, portanto, a capacidade estimada para cada célula, $\widehat{C}_i(k)$.

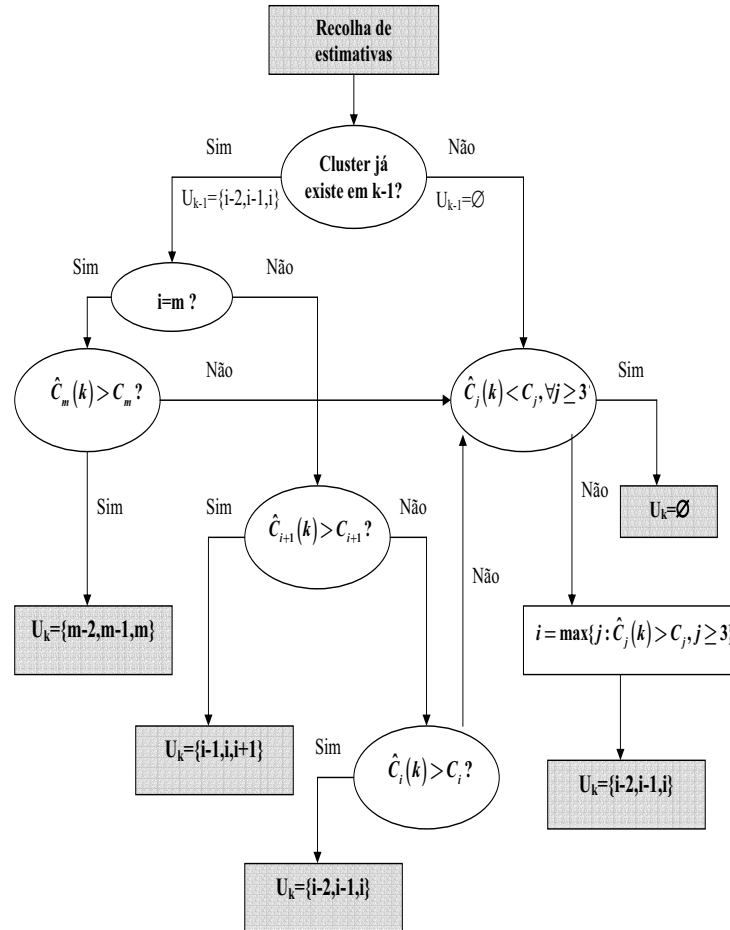


Figura 3.2: Diagrama de fluxo para construção do cluster.

Desta forma, a segunda fase da estratégia de empréstimo, que se divide em duas etapas distintas, é sucintamente descrita por:

Etapa 1: Com base na capacidade estimada e na capacidade disponível em cada célula, as células pertencentes ao cluster determinam a largura de banda que necessitam, calculando os pedidos de largura de banda. Estes pedidos são então direccionados para as células respectivas.

Etapa 2: O sucesso do empréstimo é avaliado. Caso a capacidade disponível na célula

i , $C_i^D(k)$, seja superior ao pedido que lhe é endereçado, o pedido é satisfeito; caso contrário e consoante o modelo utilizado (que teremos oportunidade de avaliar), o pedido é rejeitado ou apenas a largura de banda disponível é emprestada sendo o pedido parcialmente satisfeito. Finalmente, as células do cluster que não efectuaram pedidos de empréstimo devolvem a largura de banda que já não utilizam e é actualizada a largura de banda emprestada entre células. O processo recomeça após h unidades de tempo.

Após a apresentação sucinta das etapas que constituem a segunda fase, definamos detalhadamente cada uma delas para concluirmos a descrição do modelo de partilha de largura de banda. Para isso necessitamos de introduzir alguma notação. No que se segue, $x^+ = \max\{0, x\}$ e $x^- = \max\{0, -x\}$ para $x \in \mathbb{R}$.

Etapa 1: Pedidos de empréstimo de largura de banda

Para o cálculo dos pedidos de empréstimo em cada célula do cluster é necessário, em primeiro lugar, determinar a capacidade de serviço e a capacidade disponível em cada célula do cluster.

Para $k \in \mathbb{N}$, seja $C_i^S(k)$ a capacidade de serviço da célula i no início do período k , i.e., a largura de banda que no início do período k a célula i efectivamente dispõe para servir os móveis. Esta quantidade é apenas função da capacidade inicial atribuída à célula i , da capacidade emprestada pela célula $i - 1$ à célula i no fim do período $k - 1$, $L_{i-1,i}(k - 1)$, e da capacidade emprestada pela célula i à célula $i + 1$ no fim do período $k - 1$, $L_{i,i+1}(k - 1)$, nomeadamente,

$$C_i^S(k) = C_i + L_{i-1,i}(k - 1)I_{U_k}(i - 1) - L_{i,i+1}(k - 1)I_{U_k}(i + 1). \quad (3.3)$$

Da própria estratégia de empréstimo, $L_{i,j}(k - 1) = 0$ se $\{i, j\} \not\subseteq U_{k-1}$ ou $j \neq i + 1$. Em particular, $C_i^S(k) = C_i$ caso $i \notin U_k$, i.e., a capacidade de serviço das células não pertencentes ao cluster é igual à capacidade inicial.

Além disso, na situação especial do cluster ter avançado no troço de células, ou seja, se $U_{k-1} = \{i - 3, i - 2, i - 1\}$ e $U_k = \{i - 2, i - 1, i\}$, a capacidade de serviço nas células

$i - 1$ e $i - 2$ no período k é dada por

$$C_{i-2}^S(k) = [C_{i-2} - L_{i-2,i-1}(k-1)]^+, \quad (3.4)$$

$$C_{i-1}^S(k) = C_{i-1} + L_{i-2,i-1}(k-1) - [C_{i-2} - L_{i-2,i-1}(k-1)]^-, \quad (3.5)$$

de modo que $C_{i-2}^S(k) + C_{i-1}^S(k) = C_{i-2} + C_{i-1}$. Como, por outro lado $C_i^S(k) = C_i$,

$$\sum_{j=i-2}^i C_j = \sum_{j=i-2}^i C_j^S(k). \quad (3.6)$$

Implicitamente, estas condições garantem que nas células que deixam de pertencer ao cluster, toda a largura de banda que tenham emprestada é devolvida. Essa devolução é dada por

$$[C_j^S(k-1) - C_j^S(k)]^+. \quad (3.7)$$

Após a actualização da capacidade de serviço em cada célula do troço da auto-estrada, é calculada a capacidade disponível em cada célula do cluster. A capacidade disponível na célula j no período k , é dada por

$$C_j^D(k) = C_j^S(k) - \widehat{C}_j(k). \quad (3.8)$$

A célula j diz-se *bloqueada* no período k se $C_j^D(k) < 0$ e *não bloqueada* se $C_j^D(k) \geq 0$. Se a célula j estiver bloqueada no período k , então a capacidade em falta na célula j no período k é $[C_j^D(k)]^-$.

Uma vez determinado o cluster de células no período k , actualizada a capacidade de serviço e determinada a capacidade disponível em cada célula, são calculados os pedidos de empréstimo de largura de banda entre as células que pertencem ao cluster no período k .

Pedidos de empréstimo:

Admitindo que $U_k = \{i-2, i-1, i\}$, os pedidos de empréstimo de largura de banda da célula i à célula $i-1$ e da célula $i-1$ à célula $i-2$ no período k , respectivamente

$P_{i,i-1}(k)$ e $P_{i-1,i-2}(k)$, são dados por

$$P_{i,i-1}(k) = [C_i^D(k)]^-, \quad (3.9)$$

$$P_{i-1,i-2}(k) = \begin{cases} [[C_i^D(k)]^- - C_{i-1}^D(k)]^+, & P_{i,i-1}(k) > 0 \\ [[C_{i-1}^D(k)]^- - C_i^D(k)]^+, & P_{i,i-1}(k) = 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

Etapa 2: Actualização de parâmetros

Após o cálculo dos pedidos de cada célula pertencente ao cluster, nesta etapa, os pedidos são direccionados para as células respectivas que avaliam as suas disponibilidades. Se um pedido de empréstimo é direccionado da célula $i - 1$ para a célula $i - 2$, e

$$P_{i-1,i-2}(k) \leq C_{i-2}^D(k), \quad (3.11)$$

então, o pedido de empréstimo é inferior à largura de banda disponível na célula $i - 2$ pelo que o empréstimo é bem sucedido. Caso contrário, se

$$P_{i-1,i-2}(k) > C_{i-2}^D(k), \quad (3.12)$$

o pedido de empréstimo é superior à largura de banda que a célula tem disponível. Neste caso, consoante a estratégia adoptada, o pedido de empréstimo é rejeitado ou é apenas parcialmente bem sucedido. Se o pedido é rejeitado não é emprestada qualquer largura de banda, não existindo aumento de largura de banda de um período para o outro; se o pedido é parcialmente satisfeito, apenas a largura de banda disponível é emprestada. A seguir apresenta-se esta última estratégia.

Após a avaliação do sucesso dos empréstimos, no caso das células i e/ou $i - 1$ não efectuarem pedidos de empréstimo, as devoluções de largura de banda da célula i à célula $i - 1$ e da célula $i - 1$ à célula $i - 2$ no período k , respectivamente $D_{i,i-1}(k)$ e $D_{i-1,i-2}(k)$, são dadas por

$$D_{i,i-1}(k) = [C_i^D(k)]^+, \quad (3.13)$$

$$D_{i-1,i-2}(k) = \begin{cases} \min \{L_{i-2,i-1}(k-1), C_i^D(k) + C_{i-1}^D(k)\}, & D_{i,i-1}(k) > 0 \\ \min \{L_{i-2,i-1}(k-1), [C_{i-1}^D(k) - [C_i^D(k)]^-]^+\}, & D_{i,i-1}(k) = 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

Finalmente, no final desta etapa, a largura de banda total que a célula $i - 2$ tem emprestada à célula $i - 1$ é actualizada para

$$L_{i-2,i-1}(k) = L_{i-2,i-1}(k-1) + \min\{P_{i-1,i-2}(k), [C_{i-2}^D(k)]^+\} - D_{i-1,i-2}(k), \quad (3.15)$$

ou seja, se é efectuado um pedido de empréstimo, a largura de banda que a célula $i - 2$ tem emprestada à célula $i - 1$, aumenta num valor igual ao pedido efectuado (total ou parcial); caso contrário, se é efectuada uma devolução, a largura de banda emprestada entre a célula $i - 2$ e a célula $i - 1$, diminui num valor igual ao da largura de banda devolvida.

Por outro lado, a largura de banda total que a célula $i - 1$ tem emprestada à célula i é actualizada para

$$L_{i-1,i}(k) = L_{i-1,i}(k-1) + \min\{P_{i,i-1}(k), [C_{i-1}^D(k)]^+ + [C_{i-2}^D(k)]^+\} - D_{i,i-1}(k). \quad (3.16)$$

Será a largura de banda actualizada no final desta etapa que será utilizada no início do próximo período para actualizar a capacidade de serviço em cada célula do cluster.

Resumindo, o algoritmo de empréstimo, no período k , com $U_k = \{i - 2, i - 1, i\}$, é composto pelos seguintes passos:

Etapa 1:

1. Determinar a capacidade de serviço em cada célula j , $C_j^S(k)$, $1 \leq j \leq m$. Neste passo, se houver alguma célula que deixe de pertencer ao cluster, toda a largura de banda que possua por empréstimo é-lhe devolvida.
2. Determinar a capacidade disponível na célula j , $C_j^D(k)$, para $j \in U_k$.
3. Determinar os pedidos de empréstimo de largura de banda, $P_{i,i-1}(k)$ e $P_{i-1,i-2}(k)$.

Etapa 2:

1. Avaliar o sucesso dos pedidos de empréstimo.
2. Determinar as devoluções de largura de banda das células pertencentes ao cluster que não efectuaram pedidos de empréstimo, $D_{i,i-1}(k)$ e $D_{i-1,i-2}(k)$.
3. Actualizar a largura de banda emprestada, $L_{i-1,i}(k)$ e $L_{i-2,i-1}(k)$

3.5 Validação da estratégia de empréstimo

Após a descrição detalhada das etapas que compõem a estratégia de empréstimo, terminamos esta secção com o seguinte resultado que tem por objectivo validar o modelo de partilha de largura de banda.

O resultado seguinte garante que se a soma das estimativas das capacidades requeridas nas três células do cluster são inferiores à soma das capacidades iniciais dessas células, então, o pedido de empréstimo de largura de banda da célula $i - 1$ à célula $i - 2$, será inferior à capacidade disponível na célula $i - 2$, pelo que, nestas condições, a estratégia de empréstimo será bem sucedida. Note-se que para a estratégia de empréstimo ser bem sucedida, basta analisarmos o pedido de empréstimo da célula $i - 1$ à célula $i - 2$, pois esse pedido já integra o pedido que a célula i efectua à célula $i - 1$. Como tal, se o pedido da célula $i - 1$ à célula $i - 2$ é satisfeito, também o pedido da célula i à célula $i - 1$ o será, e a estratégia de empréstimo será bem sucedida.

Teorema 3.1 *Se $U_k = \{i - 2, i - 1, i\}$ e se*

$$\sum_{j=0}^2 \widehat{C}_{i-j}(k) \leq \sum_{j=0}^2 C_{i-j}, \quad (3.17)$$

então o pedido de empréstimo efectivo da célula $i - 1$ à célula $i - 2$ no período k é inferior à capacidade disponível da célula $i - 2$, ou seja,

$$P_{i-1,i-2}(k) \leq C_{i-2}^D(k). \quad (3.18)$$

Demonstração Em primeiro lugar, note-se que

$$\sum_{j=0}^2 C_{i-j}^S(k) = \sum_{j=0}^2 C_{i-j},$$

pois as células não pertencentes ao cluster possuem capacidade de serviço igual à inicialmente atribuída. Desta forma, se (3.17) se verifica, então, em particular,

$$C_{i-2}^D(k) = C_{i-2}^S(k) - \widehat{C}_{i-2}(k) \geq \widehat{C}_i(k) + \widehat{C}_{i-1}(k) - C_i^S(k) - C_{i-1}^S(k).$$

Apenas tem interesse o caso $P_{i-1,i-2}(k) > 0$, pois se $P_{i-1,i-2}(k) = 0$, significa que a célula $i - 1$ não efectua um pedido de empréstimo e logo, se a célula i efectua um pedido

de empréstimo à célula $i - 1$, a célula $i - 1$ tem largura de banda disponível para satisfazer o pedido (visto que o pedido de empréstimo da célula $i - 1$ à célula $i - 2$ já integra as necessidades da célula i e da célula $i - 1$).

Consideremos, em primeiro lugar, que $P_{i,i-1}(k) = [C_i^D(k)]^- > 0$. Então, neste caso

$$P_{i-1,i-2}(k) = [[C_i^D(k)]^- - C_{i-1}^D(k)]^+.$$

Assim, como $P_{i-1,i-2}(k) > 0$,

$$\begin{aligned} P_{i-1,i-2}(k) &= [C_i^D(k)]^- - C_{i-1}^D(k) \\ &= -C_i^D(k) + \widehat{C}_{i-1}(k) - C_{i-1}^S(k) \\ &= \widehat{C}_i(k) + \widehat{C}_{i-1}(k) - C_i^S(k) - C_{i-1}^S(k) \\ &\leq C_{i-2}^D(k). \end{aligned}$$

Consideremos agora que $P_{i,i-1}(k) = 0$. Então, neste caso

$$P_{i-1,i-2}(k) = [[C_{i-1}^D(k)]^- - C_i^D(k)]^+.$$

Como $P_{i-1,i-2}(k) > 0$, e devido a $C_i^D(k) \geq 0$, tem-se $[C_{i-1}^D(k)]^- > 0$. Assim,

$$\begin{aligned} P_{i-1,i-2}(k) &= [C_{i-1}^D(k)]^- - C_i^D(k) \\ &= -C_{i-1}^D(k) - C_i^D(k) \\ &= \widehat{C}_i(k) + \widehat{C}_{i-1}(k) - C_i^S(k) - C_{i-1}^S(k) \\ &\leq C_{i-2}^D(k). \quad \blacksquare \end{aligned}$$

Desde que haja largura de banda suficiente, este modelo consegue geri-la eficientemente redireccionado-a para onde ela é mais necessária de forma a suprir as deficiências de largura de banda das células afectadas pelo pico de tráfego.

Devido à monitorização do tráfego, este algoritmo é de fácil implementação em tempo real. A estimativa da capacidade requerida é o passo mais moroso e de maior importância, pelo que a eficiência da estratégia de empréstimo depende fortemente da precisão das estimativas e da rapidez do respectivo cálculo. É por isso fundamental encontrar formas computacionais simples e simultaneamente eficazes para estimar o estado futuro da rede.

Capítulo 4

Desempenho do modelo

Para aferir o desempenho do modelo de partilha de largura de banda, torna-se essencial encontrar métodos que sejam computacionalmente eficientes para estimar o estado da rede num instante futuro.

Neste capítulo apresentamos duas formas para prever a capacidade requerida numa célula após h unidades de tempo, condicional ao número de móveis em cada célula e em cada estado de teletráfego: uma com recurso ao teorema do limite central, aproximada mas computacionalmente eficiente; outra, exacta, com recurso a multinomiais, mas de difícil implementação em tempo real devido às dificuldades computacionais.

Para obtenção das estimativas da capacidade requerida numa célula num instante futuro, é necessário derivarmos a distribuição espacial do número de móveis em cada célula e em cada estado de teletráfego. Este resultado permite obter as probabilidades de um móvel transitar de célula ou de se manter na célula com estado de chamada activo.

Obtidos estes resultados, estuda-se analiticamente o efeito de certas características importantes do modelo como, por exemplo, o efeito do número de móveis na célula, da dimensão de cada célula, do tempo médio de duração das chamadas e do intervalo entre estimativas no número de móveis que transitam de célula ou realizam novas chamadas num intervalo de tempo fixo.

4.1 Densidade espacial do número de móveis

Assuma-se, no que se segue, que os móveis entram na auto-estrada em regime estacionário de teletráfego, ou seja, $q_j(0) = q_j$, para $0 \leq j \leq n$, o que implica que $q_j(s) = q_j$, para todo o $s \geq 0$. Para $x \geq 0$ e $j \in A$, seja $N_t^j(x)$ o número de móveis que no instante t se encontram no segmento $(0, x]$ da auto-estrada com estado de chamada j .

Teorema 4.1 *Para $t \geq 0$ fixo, $N_t^j = \{N_t^j(x), 0 \leq x \leq L\}$, $j \in A$, são processos de Poisson não homogéneos independentes, com média*

$$E[N_t^j(x)] = q_j \int_0^t F\left(\frac{x}{t-s}\right) \lambda(s) ds. \quad (4.1)$$

Demonstração Seja $t \geq 0$ fixo. Consideremos que um móvel que chegue à auto-estrada no instante $s \leq t$, é marcado com o tipo j se no instante t se encontra no intervalo $(0, x]$ da auto-estrada com estado de chamada j . A respectiva probabilidade é dada por

$$\begin{aligned} p_{t-s}^j(x) &= P(C(t-s) = j, (t-s)V \leq x) \\ &= P(C(t-s) = j) P\left(V \leq \frac{x}{t-s}\right) \\ &= q_j F\left(\frac{x}{t-s}\right). \end{aligned}$$

Desta forma, $N_t^j(x)$, $j \in A$, representa o número de móveis marcados com o tipo j no instante t no segmento $(0, x]$ e a probabilidade de um móvel ser marcado com o tipo j será dada por $p_{t-s}^j(x)$. Pelo Teorema 2.10, concluímos que, para $t \geq 0$ e $x \geq 0$ fixos, $N_t^j(x)$, $j \in A$, são variáveis aleatórias de Poisson independentes com médias

$$E[N_t^j(x)] = q_j \int_0^t F\left(\frac{x}{t-s}\right) \lambda(s) ds.$$

Como as variáveis aleatórias $N_t^j(x)$, $j \in A$, tem distribuição de Poisson, para provar que os processos $N_t^j = \{N_t^j(x), 0 \leq x \leq L\}$, são processos de Poisson não homogéneos independentes, basta provar que possuem incrementos independentes.

Sejam $I_k = (a_k, b_k]$, $k = 1, 2$, dois intervalos disjuntos e $N_t^j(I_k)$, $j \in A$, o número de móveis do tipo j no intervalo I_k , $k = 1, 2$. Mostremos então que as variáveis aleatórias $N_t^j(I_k)$, $j \in A$ e $k = 1, 2$, são independentes.

Considere-se que um móvel que chega à auto-estrada no instante s é marcado com o tipo (j, k) , se no instante t se encontra no conjunto I_k com estado de chamada j , o que acontece com probabilidade $r_{t-s}^j(k)$, onde

$$\begin{aligned} r_{t-s}^j(k) &= P(C(t-s) = j, (t-s)V \in I_k) \\ &= q_j \left[F\left(\frac{b_k}{t-s}\right) - F\left(\frac{a_k}{t-s}\right) \right]. \end{aligned}$$

Então, usando o Teorema 2.11, concluímos que para $t \geq 0$, $j \in A$ e $k = 1, 2$, $N_t^j(I_k)$ são variáveis aleatórias de Poisson independentes, e

$$E[N_t^j(I_k)] = q_j \int_0^t \left[F\left(\frac{b_k}{t-s}\right) - F\left(\frac{a_k}{t-s}\right) \right] \lambda(s) ds.$$

Logo, uma vez que os incrementos dos processos N_t^j , $j \in A$, são independentes, concluímos que os próprios processos N_t^j , $j \in A$, são processos de Poisson não homogêneos independentes. ■

Como, para cada instante t , os processos estocásticos N_t^j , $j \in A$, são independentes, a distribuição espacial de móveis na auto-estrada no instante t , dada por $N_t = \sum_{j \in A} N_t^j$, também é um processo de Poisson não homogêneo, com média

$$E[N_t(x)] = \int_0^t \lambda(s) F\left(\frac{x}{t-s}\right) ds. \quad (4.2)$$

A densidade (esperada) de móveis no ponto x no instante t é dada por

$$Q_t(x) = \frac{\partial E[N_t(x)]}{\partial x} = \int_0^t \frac{f\left(\frac{x}{t-s}\right) \lambda(s)}{t-s} ds. \quad (4.3)$$

Como em cada instante se conhece o número de móveis em cada célula, pode-se normalizar a densidade espacial de móveis na célula i tendo em conta o número de móveis na célula no instante t . Assim, $Q_t^i(x)$ representa a densidade da localização de um móvel escolhido a acaso entre aqueles que se encontram na célula i no instante t , ou seja,

$$Q_t^i(x) = \frac{Q_t(x)}{\int_{l_{i-1}}^{l_i} Q_t(y) dy}. \quad (4.4)$$

A densidade agregada de móveis no intervalo $(l_{i-1}, l_i]$ no instante t , condicional ao número de móveis na célula i , $Y_i(t)$, é dada por

$$\begin{aligned} \mathcal{Q}_t^i(x) &= Q_t^i(x)Y_i(t) \\ &= \frac{Q_t(x)}{\int_{l_{i-1}}^{l_i} Q_t(y) dy} Y_i(t), \end{aligned} \quad (4.5)$$

para $x \in (l_{i-1}, l_i]$.

4.2 Representação gráfica da densidade de móveis

Nesta secção iremos ilustrar a evolução do número médio de móveis e da densidade de móveis em cada célula quando a taxa de entradas é não homogénea.

Consideremos um troço da auto-estrada composto por 12 células, cada com 10 Km de comprimento. Consideremos uma taxa de entrada de móveis na auto-estrada definida por ramos, com unidade de tempo em segundos, dada por

$$\lambda(t) = \begin{cases} \frac{\cos\left(\frac{80}{43200}\pi t + \pi\right) + 3}{4}; & 7560 \leq t \bmod 16200 \leq 8640 \\ 0.5; & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (4.6)$$

onde $a \bmod b$ representa o resto da divisão inteira de a por b . Este tipo de taxa pretende simular uma situação real e representa a taxa de entradas de móveis na auto-estrada por segundo, existindo um período onde a taxa de entradas é constante e outro onde ocorre um período de congestão. Os períodos de congestão têm a duração de 18 minutos, com taxa máxima de entradas na auto-estrada de 60 móveis por minuto. Nos restantes períodos a taxa de entradas é constante, com entradas médias na auto-estrada de 30 móveis por minuto. Trata-se de um taxa de entradas periódica, com período de 270 minutos. A escolha desta taxa encontra justificação no Capítulo 5, pelo que deixemos de parte, momentaneamente, a justificação de se considerar a taxa de entradas definida desta forma. Na Figura 4.1 podemos observar a representação gráfica desta taxa de entradas num intervalo de 270 minutos durante a ocorrência de um período de congestão.

Apresentam-se de seguida os gráficos do número esperado de móveis no intervalo $(x - 10, x]$ da auto-estrada em cada instante, bem como as respectivas densidade da localização

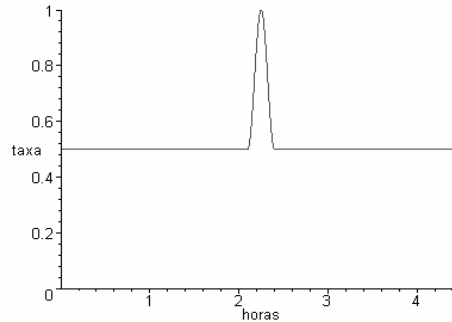


Figura 4.1: Taxa periódica de entradas de móveis na auto-estrada.

de um móvel e a densidade de móveis no ponto x . Apresentam-se também os gráficos para a célula 5 da auto-estrada, que corresponde ao intervalo $(40, 50]$ da auto-estrada. A escolha pela representação desta célula, prende-se apenas com o facto de estar localizada no centro do troço de células considerado. Por restrições computacionais, os gráficos foram obtidos considerando a velocidade constante e igual a 100 Km/h. Por esta razão, também a evolução do número médio de móveis ao longo da auto-estrada mantém-se de período para período, pelo que se torna simples prever o número de móveis em cada célula e em cada instante.

Na Figura 4.2, apresenta-se o gráfico do número médio de móveis num intervalo de 10 Km, ou seja, para cada par ordenado (x, t) está representado o número médio de móveis no segmento $(x - 10, x]$ da auto-estrada num dado instante de tempo durante um intervalo de tempo de 2 horas. Apresenta-se também o gráfico do número médio de móveis na célula 5. Podemos observar o aparecimento do pico de tráfego na auto-estrada exactamente no instante em que a taxa de entrada de móveis aumenta. Observa-se também o movimento do pico de tráfego ao longo das células com intensidade constante.

Observou-se ainda que quando a velocidade não é constante, à medida que os móveis se deslocam na auto-estrada, o pico de tráfego vai, gradualmente, diminuindo de intensidade, aumentando contudo a sua área de afectação. Este fenómeno ocorre devido às diferentes velocidades de deslocamento dos móveis, que à medida que se movimentam contribuem para uma maior dispersão de móveis ao longo da auto-estrada e, conseqüentemente, uma

diminuição de intensidade do pico de tráfego.

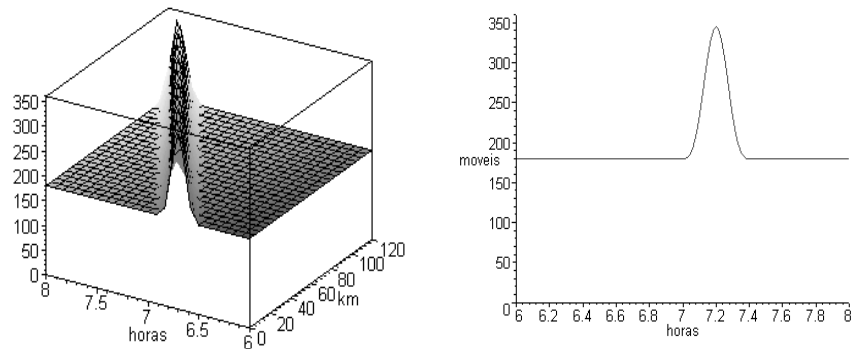


Figura 4.2: Número médio de móveis no intervalo $(x - 10, x]$ em função de x e t , e no intervalo $(40, 50]$ em função de t .

Na Figura 4.3 apresenta-se a densidade de móveis no ponto x no instante t , bem como a densidade de móveis no quilómetro 50 da auto-estrada. Observa-se exactamente o mesmo comportamento que para o número médio de móveis, verificando-se no entanto um atraso temporal do pico de tráfego. O atraso temporal é devido ao facto da densidade de móveis ser obtida no limite superior das células, pelo que apenas quando o pico de tráfego atinge este ponto se observa o efeito do pico de tráfego na densidade, enquanto o aumento do número médio de móveis na célula se verifica a partir do momento que o pico de tráfego atinge o limite inferior da célula. O desfasamento temporal é exactamente igual ao tempo necessário para o pico de tráfego percorrer toda a célula.

Por esta razão, a densidade da localização de um móvel, apresentada na Figura 4.4, irá ter um comportamento bastante interessante, pois quando o pico de tráfego surge numa célula, a densidade da localização de um móvel decresce em virtude de o limite superior da célula ainda não ter sido atingido, obtendo-se um mínimo exactamente quando o pico de tráfego atinge o limite superior da célula. A partir deste ponto, a densidade espacial da

localização de um móvel na célula cresce até atingir o seu valor máximo. Quando o pico de tráfego transpõe completamente a célula, a densidade volta a tomar o valor correspondente à taxa de entradas homogénea. Na Figura 4.4 podemos observar a evolução da densidade da localização de um móvel no intervalo $(x - 10, x]$ em cada instante t , bem como a densidade da localização de um móvel na célula 5.

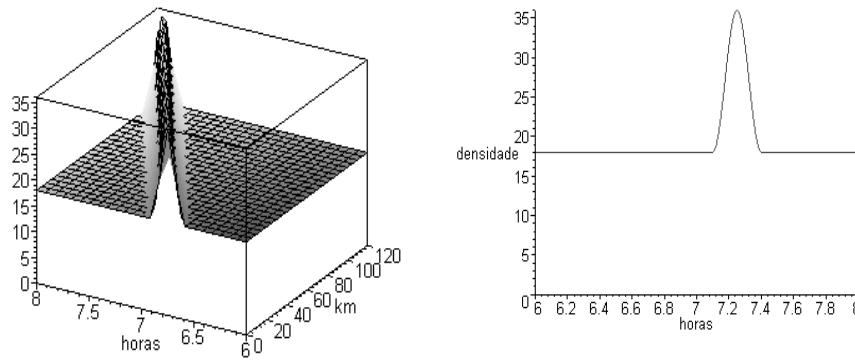


Figura 4.3: Densidade de móveis em cada ponto x e no quilómetro 50 da auto-estrada, no instante t .

Devido à imposição da taxa de entradas ser periódica, o número médio de móveis e a densidade de localização de um móvel numa célula também são periódicas. Desta forma, sempre que necessitarmos de utilizar o valor da densidade na célula i , evitamos o seu cálculo, que pode ser bastante moroso, e obtemos os seus valores num período e em instantes múltiplos de h - os instantes de monitorização da rede.

4.3 Estimativa exacta do estado da rede

É possível obter a distribuição exacta do número de móveis que, em h unidades de tempo, efectuem uma nova chamada ou realizam handoff, condicional ao conhecimento do número

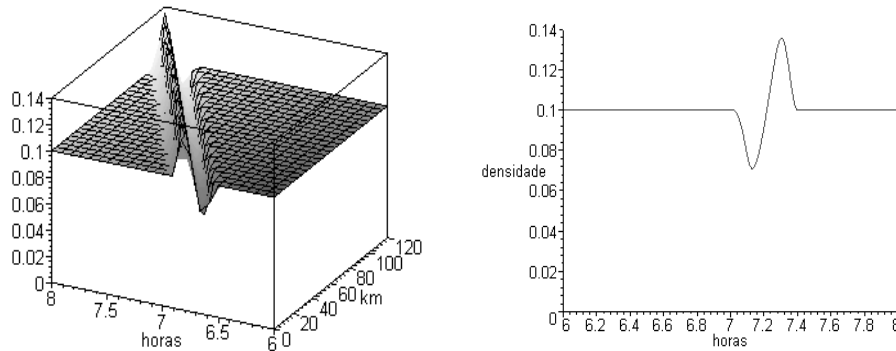


Figura 4.4: Densidade da localização de um móvel escolhido ao acaso no intervalo $(x - 10, x]$ e na célula 5, no instante t .

de móveis em cada célula e em cada estado de teletráfego. No entanto, o uso destes resultados implica grandes esforços computacionais, que não são compatíveis com a celeridade, a nível de cálculo, necessária nas futuras redes de telecomunicações móveis.

Consideremos que se encontram n_i móveis na célula i , dos quais n_i^j se encontram no estado j , tal que $n_i = \sum_{j \in A} n_i^j$. Então, $S_i(t) = (n_i^j, j \in A)$ representa o estado da célula i no instante t e $S(t) = (S_1(t), \dots, S_m(t))$ o estado (global) da rede no instante t . Explora-se o conhecimento do estado da rede, nomeadamente, o número de móveis em cada célula e em cada estado de teletráfego, para prever o estado da rede num instante futuro. Abordagens similares, mas para redes bidimensionais, foram propostas por Antunes, Pacheco e Rocha [4].

Para prever o estado da rede no instante $t + h$, tendo por base o estado da rede no instante t , a escolha do intervalo de previsão, h , deve ser tal que um móvel não possa efectuar mais do que um handoff no intervalo $(t, t + h]$. Para isso, temos que considerar velocidades limitadas por algum valor τ , sendo o intervalo h tal que $h\tau \leq l_i - l_{i-1}$, para

$i = 1, 2, \dots, m$. Note-se que desde que a probabilidade de efectuar mais do que uma transição seja pequena, não é necessário exigir esta condição.

Este pressuposto permite que o aumento da largura de banda na célula i neste intervalo de tempo apenas se deve a:

- Móveis que transitam da célula $i - 1$ para a célula i durante o intervalo $(t, t + h]$ e que no instante $t + h$ se encontram com estado de teletráfego activo na célula i .
- Móveis que se encontram num estado inactivo na célula i no instante t e no instante $t + h$ ainda se encontram na célula i com estado de chamada activo.

Por outro lado, a diminuição da largura de banda na célula i nas próximas h unidades de tempo é apenas devido a:

- Handoffs de móveis da célula i para a célula $i + 1$ durante o intervalo $(t, t + h]$.
- Fim de chamada dos móveis que se encontram activos na célula i no instante t .

Desta forma, para estimar o estado de uma célula da rede após um intervalo de tempo de amplitude h , apenas se necessita de ter em conta o número de móveis na célula e na célula anterior. Ou seja, estimam-se os móveis provenientes da célula anterior que após h unidades de tempo se encontram activos na célula e os móveis que se mantêm na célula e que após h unidades tempo se encontram activos.

Como supusemos que os móveis entram na auto-estrada em regime estacionário de teletráfego, a densidade da localização de um móvel na célula i , $Q_i^i(x)$, é igual à densidade da localização de um móvel na célula i com estado de chamada j , facto esse a que vamos recorrer já de seguida.

Para $1 \leq i \leq m$, $k \in A_1$, $j \in A$ e $t, h \geq 0$, seja $A_i^{jk}(t, h)$ o evento correspondente a um móvel, escolhido ao acaso entre os que no instante t se encontram na célula i com estado de chamada j , continuar, após h unidades de tempo, na célula i com estado de chamada activo k .

Conhecido o estado do móvel no instante inicial t , e condicionando na densidade da localização de um móvel escolhido ao acaso na célula i nesse instante, vem

$$\begin{aligned} P\left(A_i^{jk}(t, h)\right) &= P(C(t+h) = k | C(t) = j) \int_{l_{i-1}}^{l_i} P\left(V \leq \frac{l_i - x}{h}\right) Q_t^i(x) dx \\ &= q_{jk}(h) \int_{l_{i-1}}^{l_i} \int_0^{\frac{l_i - x}{h}} Q_t^i(x) f(v) dv dx. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Conhecendo o número de móveis em cada célula e em cada estado de teletráfego no instante t , podemos obter a distribuição de probabilidade do número de móveis em cada estado de teletráfego activo na célula no instante $t+h$. Seja $X_i^k(t+h)$, o número de móveis que no instante $t+h$ se encontram na célula i com estado de chamada activo k e no instante t se encontravam na célula i . Então, a função massa de probabilidade do número de móveis que após h unidades de tempo se mantêm na célula i com estado de chamada activo, condicional ao número de móveis que se encontram em cada célula e em cada estado de teletráfego, é dada por

$$\begin{aligned} P\left(X_i^k(t+h) = x^k, k \in A_1 | S_i(t)\right) &= \\ &= \sum_{\Phi_i} \prod_{j \in A} \frac{n_i^j!}{x_i^{j0}! \prod_{k \in A_1} x_i^{jk}!} \prod_{k \in A_1} \left[P\left(A_i^{jk}(h)\right) \right]^{x_i^{jk}} \left[1 - \sum_{k \in A_1} P\left(A_i^{jk}(h)\right) \right]^{x_i^{j0}} \end{aligned} \quad (4.8)$$

onde $\Phi_i = \{(x_i^{j0}, x_i^{jk}, k \in A_1), j \in A : (x_i^{j0}, x_i^{jk}, k \in A_1) \in \mathbb{N}_0^{\#A_1+1}, \sum_{k \in A_1} x_i^{jk} + x_i^{j0} = n_i^j, j \in A, \text{ e } \sum_{j \in A} x_i^{jk} = x^k, k \in A_1\}$

De forma análoga, seja $H_i^{jk}(t, h)$ o evento correspondente a um móvel, escolhido ao acaso entre os que no instante t se encontram na célula $i-1$ com estado de chamada j , estar após h unidades de tempo na célula i com estado de chamada activo k . Conhecido o estado do móvel e condicionando na densidade de localização de um móvel escolhido ao acaso na célula $i-1$ no instante t , conclui-se que

$$\begin{aligned} P(H_i^{jk}(t, h)) &= P(C(t+h) = k | C(t) = j) \int_{l_{i-2}}^{l_{i-1}} P\left(V \geq \frac{l_{i-1} - x}{h}\right) Q_t^{i-1}(x) dx \\ &= q_{jk}(h) \int_{l_{i-2}}^{l_{i-1}} \int_{\frac{l_{i-1} - x}{h}}^{\infty} Q_t^{i-1}(x) f(v) dv dx. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Finalmente, seja $W_i^k(t+h)$ o número de móveis que se encontram activos na célula i com estado de chamada k no instante $t+h$ e, no instante t , se encontravam na célula $i-1$. A função massa de probabilidade do número de móveis que transitam para a célula i em $(t, t+h]$ e se encontram activos em $t+h$, condicional ao número de móveis que se encontravam na célula $i-1$ no instante t em cada estado de teletráfego, é dada por

$$P(W_i^k(t+h) = w^k, k \in A_1 | S_{i-1}(t)) = \sum_{\Gamma_i} \prod_{j \in A} \frac{n_{i-1}^j!}{w_{i-1}^{j0}! \prod_{k \in A_1} w_{i-1}^{jk}!} \prod_{k \in A_1} \left[P(H_i^{jk}(h)) \right]^{w_{i-1}^{jk}} \left[1 - \sum_{k \in A_1} P(H_i^{jk}(h)) \right]^{w_{i-1}^{j0}} \quad (4.10)$$

onde $\Gamma_i = \{((w_{i-1}^{j0}, w_{i-1}^{jk}, k \in A_1), j \in A) : (w_{i-1}^{j0}, w_{i-1}^{jk}, k \in A_1) \in \mathbb{N}_0^{\#A_1+1}, \sum_{k \in A_1} w_{i-1}^{jk} + w_{i-1}^{j0} = n_{i-1}^j, j \in A, \text{ e } \sum_{j \in A} w_{i-1}^{jk} = w^k, k \in A_1\}$

Recorda-se que $Y_i^k(t+h)$, $k \in A_1$, representa o número de móveis que se encontram na célula i com estado chamada k no instante $t+h$. Este número de móveis teve que ter origem em móveis que se encontravam na célula i no instante t e que se mantém na célula i com estado de chamada activo k no instante $t+h$; e de móveis que transitaram para a célula i e no instante $t+h$ se encontram activos com estado de chamada k , sendo independentes os móveis provenientes de cada um destes casos. A distribuição de probabilidades do número de móveis na célula i com estado de teletráfego k no instante $t+h$, conhecido o número de móveis em cada estado de teletráfego nas células i e $i-1$ no instante t , é dada por

$$\begin{aligned} P(Y_i^k(t+h) = y^k, k \in A_1 | S(t)) &= \\ &= \sum_{\Psi_i} P(X_i^k(t+h) = x^k; W_i^k(t+h) = w^k, k \in A_1 | S(t)) \\ &= \sum_{\Psi_i} P(X_i^k(t+h) = x^k, k \in A_1 | S_i(t)) P(W_i^k(t+h) = w^k, k \in A_1 | S_{i-1}(t)) \end{aligned} \quad (4.11)$$

onde $\Psi_i = \{((x^k, w^k)), k \in A_1 : (x^k, w^k) \in \mathbb{N}_0^2; x^k + w^k = y^k\}$.

Finalmente, para obter a distribuição da capacidade ocupada na célula i após h unidades de tempo, é suficiente multiplicar a capacidade ocupada por um móvel com

estado teletráfego activo k pelo número de móveis nesse estado, para cada estado activo k , obtendo-se

$$\begin{aligned}
 P(C_i^R(t+h) \leq C | S(t)) &= P\left(\sum_{k=1}^n b_k Y_i^k(t+h) \leq C | S(t)\right) = \\
 &= \sum_{k_1=0}^{\lfloor \frac{C}{b_1} \rfloor} \sum_{k_2=0}^{\lfloor \frac{C-k_1 b_1}{b_2} \rfloor} \dots \sum_{k_n=0}^{\frac{C-\sum_{i=1}^{n-1} b_i k_i}{b_n}} P(Y_i^j(t+h) = k_j, j \in A_1 | S(t)) \quad (4.12)
 \end{aligned}$$

com $\lfloor \frac{a}{b} \rfloor$ a representar a divisão inteira de a por b .

Obviamente que o cálculo de (4.12) exige grandes recursos computacionais, pelo que se torna inviável a sua implementação em tempo real e em situações em que a facilidade de cálculo é exigida. Desta forma, o uso deste resultado não é adequado para aplicar nas futuras redes de telecomunicações móveis, nomeadamente, na previsão em tempo real do estado futuro da rede.

Torna-se portanto necessária a obtenção de um resultado que seja computacionalmente viável e que estime eficientemente o estado da rede em instantes futuros.

4.4 Estimativa aproximada do estado da rede

Fazendo uso dos resultados já obtidos na secção anterior, obtemos agora uma estimativa do estado da rede por aproximação à distribuição Normal. Consideremos igualmente que os móveis entram na auto-estrada em regime estacionário do estado de teletráfego.

Tal como foi efectuado na secção anterior, o estado da rede na célula i após h unidades de tempo pode ser estimado pelas contribuições dos móveis que se encontram na célula i e que após h unidades de tempo continuam na célula i com estado de teletráfego activo; e dos móveis que transitam para a célula i e que após h unidades de tempo se encontram com estado de teletráfego activo.

Para $1 \leq i \leq m$, $j \in A$ e $t, h \geq 0$, seja $B_i^j(t, t+h)$, a capacidade ocupada na célula i no instante $t+h$ por um móvel escolhido aleatoriamente entre os que no instante t se encontram na célula i com estado de chamada j . Recorrendo ao resultado (4.7) da secção

anterior, o valor esperado e a variância de $B_i^j(t, t+h)$ são, respectivamente, dadas por

$$E[B_i^j(t, t+h)] = \sum_{k \in A_1} P(A_i^{jk}(t, h)) b_k \quad (4.13)$$

$$\text{Var}[B_i^j(t, t+h)] = \sum_{k \in A_1} P(A_i^{jk}(t, h)) b_k^2 - (E[B_i^j(t, t+h)])^2. \quad (4.14)$$

Seja $C_i^M(t+h)$ a capacidade ocupada no instante $t+h$ pelos móveis que se mantêm na célula i durante o intervalo $(t, t+h]$. Como os móveis se comportam independentemente, o valor esperado e a variância de $C_i^M(t+h)$, condicionando no número de móveis em cada estado de teletráfego na célula i são, respectivamente,

$$E[C_i^M(t+h)|S_i(t)] = \sum_{j \in A} E[B_i^j(t, t+h)] n_i^j \quad (4.15)$$

$$\text{Var}[C_i^M(t+h)|S_i(t)] = \sum_{j \in A} \text{Var}[B_i^j(t, t+h)] n_i^j. \quad (4.16)$$

De forma análoga, e recorrendo ao resultado (4.9) da secção anterior, consideremos agora os móveis que transitam para a célula i . Seja $G_i^j(t, t+h)$ a capacidade ocupada na célula i no instante $t+h$ por um móvel escolhido aleatoriamente entre os que no instante t se encontram na célula $i-1$ com estado de chamada j . O valor esperado e a variância de $G_i^j(t, t+h)$ são, respectivamente,

$$E[G_i^j(t, t+h)] = \sum_{k \in A_1} P(H_i^{jk}(t, h)) b_k \quad (4.17)$$

$$\text{Var}[G_i^j(t, t+h)] = \sum_{k \in A_1} P(H_i^{jk}(t, h)) b_k^2 - (E[G_i^j(t, t+h)])^2. \quad (4.18)$$

Seja $C_i^H(t+h)$ a capacidade ocupada no instante $t+h$ pelos móveis que transitam para a célula i durante o intervalo de tempo $(t, t+h]$. Condicionando no número de móveis em cada estado de teletráfego na célula $i-1$, o valor esperado e a variância de $C_i^H(t+h)$ são, respectivamente,

$$E[C_i^H(t+h)|S_{i-1}(t)] = \sum_{j \in A} E[G_i^j(t, t+h)] n_{i-1}^j \quad (4.19)$$

$$\text{Var}[C_i^H(t+h)|S_{i-1}(t)] = \sum_{j \in A} \text{Var}[G_i^j(t, t+h)] n_{i-1}^j. \quad (4.20)$$

Como os móveis se comportam independentemente, o valor esperado e a variância da capacidade requerida na célula i em $t + h$ são, respectivamente,

$$E[C_i^R(t+h)|S(t)] = E[C_i^M(t+h)|S_i(t)] + E[C_i^H(t+h)|S_{i-1}(t)] \quad (4.21)$$

$$\text{Var}[C_i^R(t+h)|S(t)] = \text{Var}[C_i^M(t+h)|S_i(t)] + \text{Var}[C_i^H(t+h)|S_{i-1}(t)]. \quad (4.22)$$

Propomos duas aproximações para decisões de controlo de chamadas. Para condições de tráfego em que o número de móveis em cada célula é baixo, o uso das desigualdades de Markov e Chebyshev (ver, e.g., Feller, [9]) originam os seguintes limites

$$P(C_i^R(t+h) \geq R|S(t)) \leq \frac{E[C_i^R(t+h)|S(t)]}{R} \quad (4.23)$$

$$P(|C_i^R(t+h) - E[C_i^R(t+h)]| \geq R|S(t)) \leq \frac{\text{Var}[C_i^R(t+h)|S(t)]}{R^2}, \quad (4.24)$$

onde R é a taxa de transmissão (bit/s).

Quando o número de móveis nas células i e $i-1$ se torna grande, a capacidade ocupada na célula i após h unidades de tempo pode ser aproximada pelo teorema do limite central de Lindeberg para somas de variáveis aleatórias não identicamente distribuídas (ver, e.g., Feller, [9]). Desde que a capacidade requerida não seja dominada por um número pequeno de móveis, o TLC permite-nos afirmar que, para $h > 0$,

$$\frac{(C_i^R(t+h)|S(t)) - E[C_i^R(t+h)|S(t)]}{\sqrt{\text{Var}[C_i^R(t+h)|S(t)]}} \underset{a}{\approx} N(0,1). \quad (4.25)$$

Tendo em conta que quando a célula i se encontra bloqueada o número de móveis nas células i e $i-1$ torna-se bastante elevado, faz sentido utilizar o TLC para aproximar a capacidade requerida na célula i no instante $t+h$. Então, para a estimativa da capacidade requerida no instante $t+h$ determinamos o valor que, com uma elevada probabilidade, seja superior ao valor observado da capacidade requerida em $t+h$, ou seja, determinamos os valores de R tais que $P(C_i^R(t+h) \leq R|S(t)) \geq 1 - \alpha$. Obtém-se a largura de banda R , tal que

$$R \geq E[C_i^R(t+h)|S(t)] + \Phi^{-1}(1 - \alpha) \sqrt{\text{Var}[C_i^R(t+h)|S(t)]}, \quad (4.26)$$

onde $\Phi^{-1}(1 - \alpha)$ representa o quantil de probabilidade $(1 - \alpha)$ da distribuição normal padrão.

Assim, se estimarmos a capacidade requerida pelo valor mínimo de R que verifique a desigualdade (4.26), garantimos que o valor que a capacidade requerida irá tomar em $t + h$ é inferior a R com probabilidade aproximadamente $1 - \alpha$.

Finalmente, como a qualidade de serviço da rede é determinada pela probabilidade de bloqueio de uma ligação (handoff ou nova), vamos encontrar também uma forma de estimar esta probabilidade. Se esta probabilidade for superior aos níveis previamente fixados pelo operador da rede móvel, a qualidade de serviço será inferior à desejada, pelo que será necessário tomar medidas de controlo de forma a prevenir a diminuição da qualidade de serviço.

Recorrendo à aproximação à distribuição normal, a probabilidade de bloqueio é dada por

$$P(C_i^R(t+h) > C_i^S(t)) \simeq 1 - \Phi\left(\frac{C_i^S(t) - E[C_i^R(t+h)|S(t)]}{\sqrt{\text{Var}[C_i^R(t+h)|S(t)]}}\right) \quad (4.27)$$

Obtemos assim uma forma, embora aproximada, de estimar a estado da rede sem necessidade de grandes recursos computacionais, e que poderá ser facilmente implementada para, em tempo real, produzir estimativas aproximadas do estado futuro da rede, efectuando simultaneamente uma avaliação da qualidade de serviço prestada.

4.5 Resultados analíticos

Nesta secção apresentamos alguns resultados analíticos para avaliar o impacto de algumas características no modelo integrado de mobilidade e teletráfego. Alguns destes resultados são indicados apenas para planeamento da rede. Iremos analisar o impacto do período de congestão, da dimensão da célula, do tempo médio de duração das chamadas e do tempo entre estimativas no número de novas chamadas e no número de móveis que transitam de célula. Finalmente, para avaliarmos a qualidade das estimativas, realizaremos comparações entre a estimativa da capacidade requerida após h unidades de tempo com a capacidade realmente observada.

Assumimos que os móveis entram na auto-estrada com distribuição estacionária do estado de chamada, a dimensão de cada célula é de 10 Km e existem apenas dois estados de chamada (activo e inactivo).

A probabilidade de um móvel entrar na auto-estrada com chamada activa é de 0.25 e a duração média da chamada é de 100 segundos. O tempo médio de permanência no estado inactivo é de 300 segundos. A taxa de entrada na auto-estrada, com unidades em segundos, é dada por

$$\lambda(t) = \begin{cases} \frac{\cos(\frac{80}{43200}\pi t + \pi) + 3}{4}, & 7560 \leq t \bmod 16200 \leq 8640, \\ 0.5, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.28)$$

Finalmente, consideramos um intervalo entre estimativas de amplitude $h = 180$ segundos e assumimos que a distribuição da velocidade é triangular simétrica com amplitude de 40 Km/h e média de 100 Km/h. Centremos a análise numa célula particular do troço de células da auto-estrada - a célula 5.

Para se perceber o impacto do período de congestão no número de móveis que transitam de célula e no número de novas chamadas, obteve-se o número médio de móveis na célula, bem como o número médio de móveis activos e inactivos, para diferentes intensidades do pico de tráfego. Considerou-se então um número médio de 180, 260 e 310 móveis na célula, que representam diferentes etapas do período de congestão. Se o número médio de móveis na célula é de 180, em média, encontram-se 45 móveis activos e 135 móveis inactivos na célula. Se o número médio de móveis na célula é de 260, em média, 65 móveis estão activos e 195 inactivos. Finalmente, quando o número médio de móveis é 310, em média, 80 móveis estão activos e 230 inactivos. Pretende-se desta forma representar a evolução do pico de tráfego no troço da auto-estrada.

A Figura 4.5 reflecte o efeito do período de congestão na função distribuição do número de móveis que transitam de célula e após h unidades de tempo se encontram activos, calculada por intermédio de (4.10). A Figura 4.6 apresenta o impacto do período de congestão na função distribuição do número de novas ligações, usando um resultado equivalente à expressão (4.8).

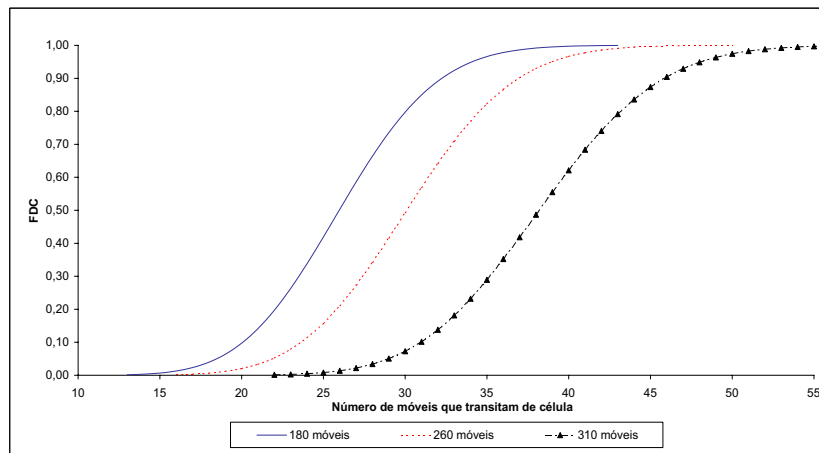


Figura 4.5: FDC do número de móveis que transitam de célula e após h unidades de tempo se encontram activos, variando o número médio de móveis na célula.

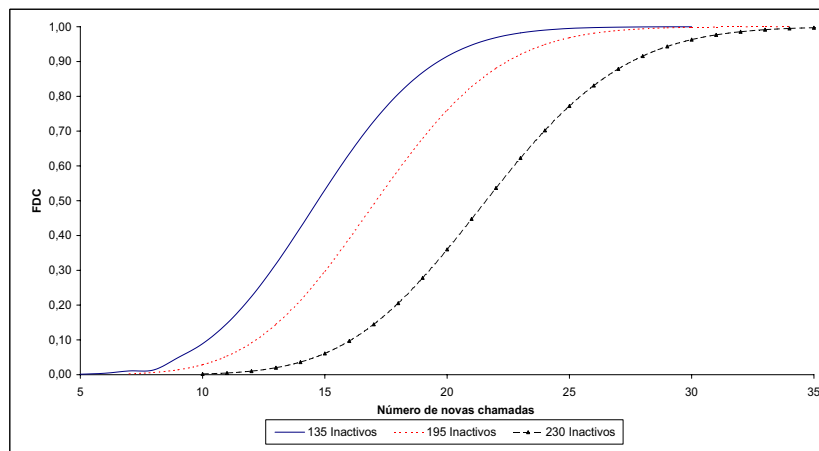


Figura 4.6: FDC do número de novas chamadas, variando o número médio de móveis inactivos na célula.

Pela análise dos gráficos, concluímos que à medida que aumenta o número médio de móveis na auto-estrada aumentam tanto o número de novas chamadas como o número de móveis que transitam de célula no intervalo de tempo h . Note-se que o aumento do

número de móveis inactivos na célula está associado ao aumento do número de móveis na célula. Desta forma verifica-se, tal como seria de esperar, que o aparecimento do pico de tráfego tem um grande impacto quer na qualidade de serviço da rede quer nas previsões do estado da rede. Torna-se portanto essencial monitorizar a rede para, atempadamente, prever e minorar o impacto provocado pelo período de congestão.

Embora os móveis inactivos numa célula não impliquem ocupação de recursos, estes resultados mostram que o seu conhecimento é determinante para a correcta estimativa do estado da rede. O conhecimento do número de móveis inactivos em cada célula permite ao operador reagir atempadamente a alterações significativas do estado da rede. Desta forma, os móveis inactivos são extremamente importantes para a implementação de medidas de controlo da rede. A inexistência de métodos de avaliação do estado da rede é portanto prejudicial à qualidade de serviço da rede, principalmente durante a ocorrência de períodos de congestão.

Para averiguarmos a influência do pico de tráfego no número de novas chamadas, consideremos que o pico de tráfego está a afectar a célula 5, encontrando-se nesta 310 móveis, sendo que destes, 230 estão inactivos e 80 activos. Para verificarmos a influência do pico de tráfego no número de móveis que transitam para a célula 5 e após h unidades de tempo se encontram activos, consideremos que o pico de tráfego está a afectar a célula anterior, pelo que se encontram 310 móveis na célula 4, 230 activos e 80 inactivos. Note-se que estes resultados são válidos para quaisquer outras células.

Na Figura 4.7 representa-se a influência do intervalo de tempo h no número de móveis que transitam de célula e após h unidades de tempo se encontram com estado de chamada activo. Estes resultados mostram que o aumento do intervalo de tempo h origina um maior número de transições. A escolha adequada de h que satisfaça os requisitos do modelo - não permitir mais do que um handoff nesse intervalo de tempo - e simultaneamente permita estimar eficientemente o estado da rede, tem uma importância fulcral no bom desempenho do modelo de partilha de largura de banda.

Este resultado sugere que quando existe uma elevada percentagem de largura de banda utilizada na célula é conveniente a estimativa do estado da rede num intervalo de tempo mais reduzido, pois só assim podem ser detectadas atempadamente as alterações súbitas

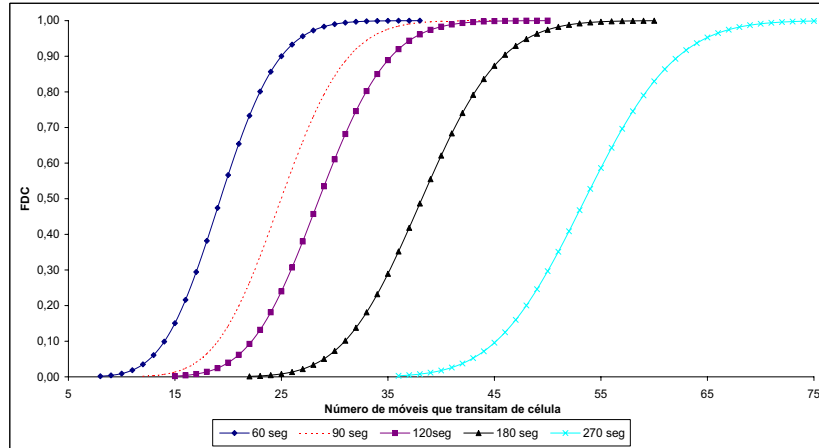


Figura 4.7: FDC do número de móveis que transitam de célula, para diferentes tempos entre estimativas.

do estado da rede. Quando a percentagem de utilização de largura de banda é baixa, poderá ser utilizado, e talvez seja conveniente por razões económicas, um intervalo maior para a estimativa do estado da rede. Assim, na presença de períodos com um nível elevado de ocupação de largura de banda deveriam ser utilizados tempos de previsão mais curtos e em períodos com um nível baixo de ocupação tempos de previsão maiores. Desta forma, medidas de controlo dinamicamente adaptadas às exigências da rede podem introduzir novas variáveis no modelo - a integração de parâmetros económicos - e conduzir a uma melhor gestão de recursos.

No entanto, para facilitar a exposição, iremos utilizar um intervalo de tempo entre estimativas constante.

As figuras 4.8 e 4.9 mostram a FDC do número de novas chamadas e do número de móveis que transitam de célula, respectivamente, para diferentes tempos médios de duração das chamadas. Fez-se variar o tempo de duração da chamada, mantendo-se constante e igual a 400 segundos o tempo médio entre duas chamadas consecutivas.

Pela análise da Figura 4.8, verificamos que o aumento do tempo médio de duração da chamada, origina, num intervalo de tempo fixo, um aumento no número de novas

chamadas. O mesmo acontece na Figura 4.9, onde o número de móveis que transitam de célula e após h unidades de tempo se encontram com estado de chamada activo aumenta com o aumento do tempo médio de duração das chamadas. Desta forma, perante taxas de entradas iguais, para classes de teletráfego com períodos de inactividade longos, é necessária uma menor largura de banda para acomodar as chamadas.

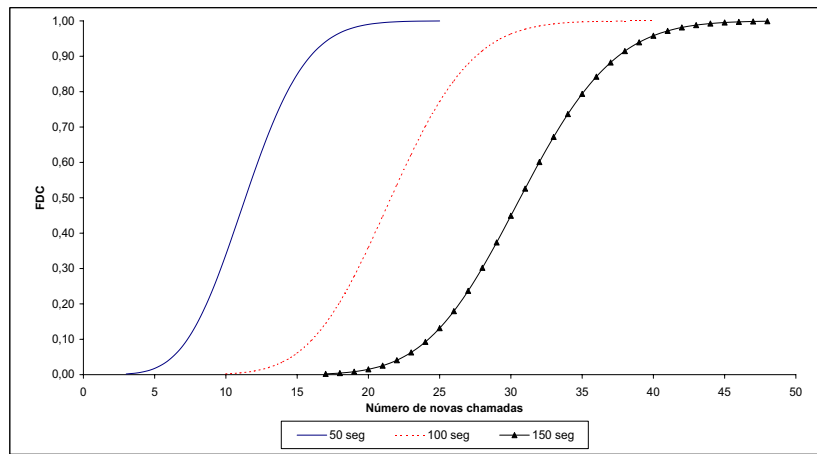


Figura 4.8: FDC do número de móveis que efectuam novas chamadas, variando os tempos médios de permanência no estado activo.

As figuras 4.10 e 4.11 apresentam as FDC do número de móveis que transitam de célula e realizam novas chamadas, respectivamente, para diferentes dimensões das células. Estes resultados têm bastante importância no planeamento da rede.

Pela análise da Figura 4.10, podemos verificar que a dimensão das células é um factor irrelevante no número de móveis que transitam de célula e que após h unidades de tempo se encontram activos, desde que o intervalo de tempo h seja tal que não permita que um móvel realize mais do que um handoff. Segundo Antunes [1], isto acontece porque se mede a taxa à qual os móveis passam por um ponto da auto-estrada - o extremo superior da célula.

Por outro lado, o tamanho da célula é um factor bastante importante na avaliação do

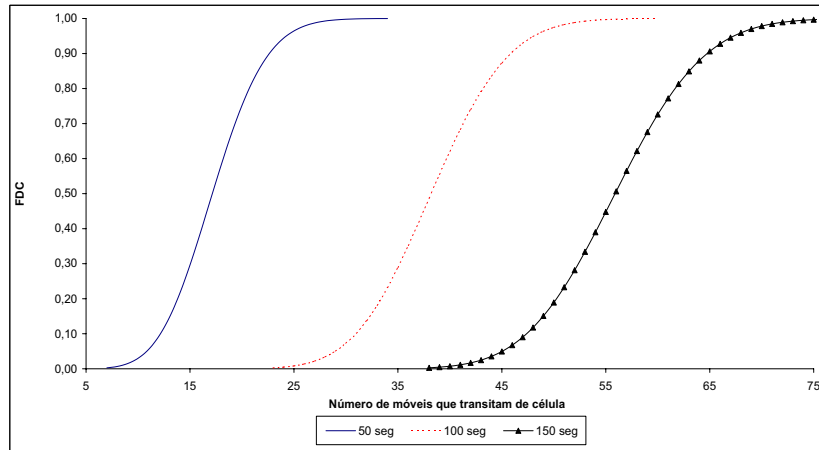


Figura 4.9: FDC do número de móveis que transitam de célula e se encontram activos após h unidades de tempo, variando os tempos médios de permanência no estado activo.

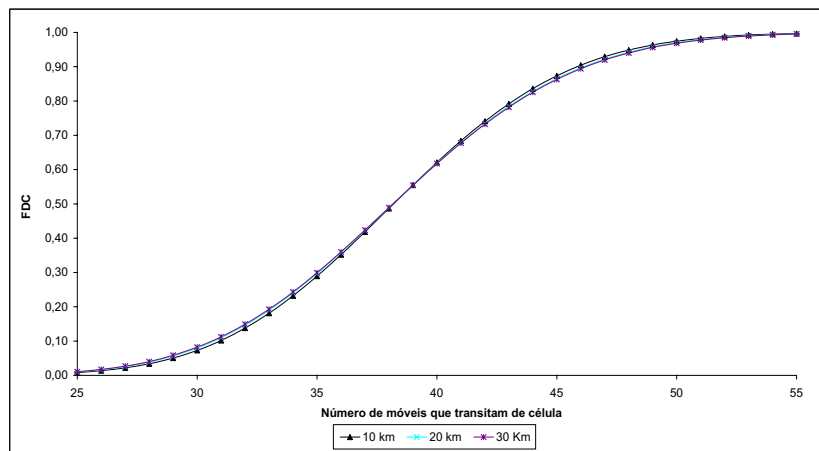


Figura 4.10: FDC do número de móveis que transitam de célula e que após h unidades de tempo se encontram activos, para diferentes dimensões das células.

número de novas chamadas. Durante o mesmo intervalo de tempo, o aumento da dimensão da célula origina um maior número de novas chamadas. Isto acontece devido ao maior

número de móveis que a célula consegue acomodar, e conseqüentemente no maior número de móveis inactivos que aí se encontram, o que provoca um aumento proporcional no número de novas chamadas. O número de móveis inactivos na célula toma assim relevância não só na implementação de medidas de controlo, como também no planeamento da rede, nomeadamente, em estudos orientados para o posicionamento e para a atribuição da largura de banda disponível em cada BS.

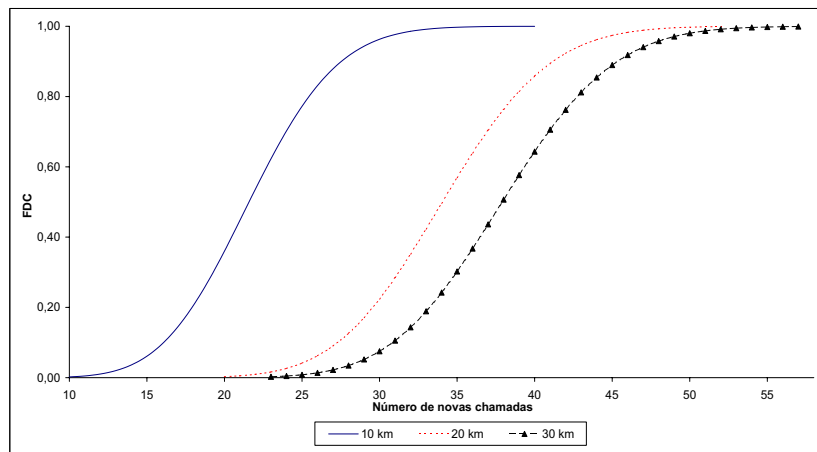


Figura 4.11: FDC do número de móveis que efectuam novas chamadas, para diferentes dimensões das células.

O desempenho do modelo de partilha de largura de banda está intimamente ligado à qualidade das estimativas. Assim, tão importante como um modelo adequado é a atempada previsão da alteração do estado da rede e a implementação de medidas de controlo adequadas. Efectuou-se a comparação da capacidade estimada com a capacidade realmente observada em duas situações distintas: quando a taxa de entradas é homogénea e quando a taxa de entradas não é homogénea provocando um pico de tráfego na auto-estrada a afectar as células 5 e 6.

Na taxa de entradas homogénea considerou-se uma taxa de entradas de móveis na auto-estrada de 30 móveis por minuto e na presença de um pico de tráfego considerou-

se a taxa de entradas dada por (5.1). Admitimos, além disso, que as chamadas activas necessitam de 16 kbits/s para serem atendidas.

Nas figuras 4.12 e 4.13 obtivemos as estimativas da capacidade requerida na célula para estes dois cenários distintos. Para isso obteve-se, através dos resultados (4.21) e (4.22), a capacidade média estimada após 180 segundos, a capacidade média observada nesse instante e os limites dos intervalos de confiança a 95% para a capacidade usada após 180 segundos.

Através da Figura 4.12 podemos observar que quando não existe nenhum pico de tráfego na auto-estrada, o modelo apresenta estimativas bastante razoáveis, conseguindo prever adequadamente o estado da rede em instantes futuros.

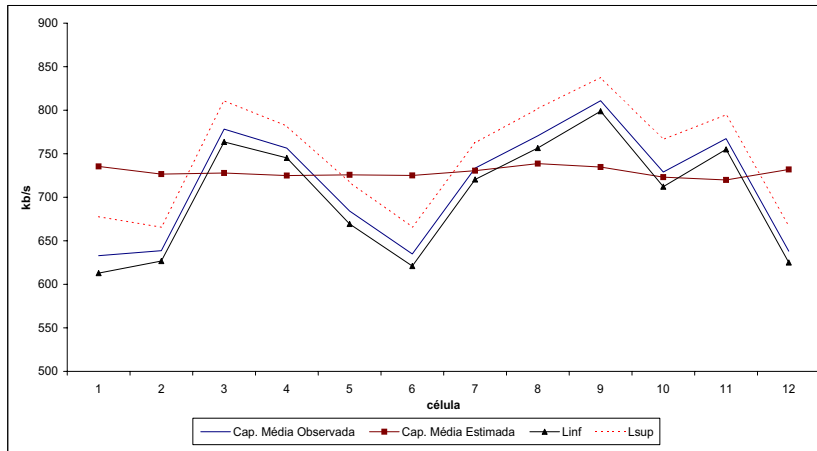


Figura 4.12: Comparação entre as capacidades observadas e as capacidades estimadas através da aproximação à distribuição normal.

Através da Figura 4.13 podemos também concluir que mesmo na presença de um pico de tráfego, o modelo consegue prever essa ocorrência, obtendo-se estimativas do estado da rede bastante precisas.

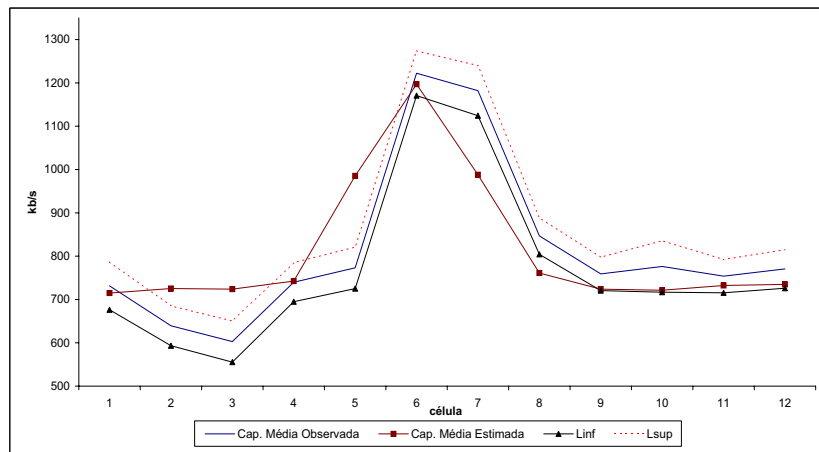


Figura 4.13: Comparação entre as capacidades observadas e as capacidades estimadas através da aproximação à distribuição normal, na presença de um período de congestão.

Capítulo 5

Simulação

Nesta Capítulo iremos aferir o desempenho do modelo de partilha de largura de banda por intermédio de simulação.

Foi efectuada simulação por eventos discretos, comparando várias estratégias de empréstimo para averiguar a que apresentava melhores resultados. O modelo de simulação foi construído com recurso à linguagem PARSEC [20] desenvolvida pela UCLA. A utilização de simulação permite considerar determinadas características das redes sem fios que dificilmente se podem incorporar no modelo matemático para permitir a sua análise.

Consideramos que o processo de entradas é Poisson não homogéneo, com taxa de entradas de móveis no início da auto-estrada dada por

$$\lambda(t) = \begin{cases} \frac{\cos(\frac{80}{43200}\pi t + \pi) + 3}{4}; & 7560 \leq t \bmod 16200 \leq 8640 \\ 0.5; & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (5.1)$$

que pretende recriar a situação em que existe um período de tráfego intenso na auto-estrada, que provoca uma diminuição da qualidade de serviço da rede. Esta taxa tem como unidade de tempo o segundo, e representa a entrada de tráfego na auto-estrada durante um período de 4.5 horas, onde a taxa mínima de entradas é de 30 móveis por minuto. Durante o período de congestão a taxa máxima de entrada de móveis na auto-estrada é de 60 móveis por minuto.

A escolha da taxa de entradas (5.1) permite observar o desempenho do modelo de partilha de largura de banda durante um dado período do dia, e a sua utilização garante

que num dado instante apenas existe um único pico de tráfego no troço de células e este não abrange mais do que duas células consecutivas.

A avaliação do desempenho do modelo de partilha de largura de banda será efectuado através da probabilidade de bloqueio de chamadas. Na análise estatística dos resultados, para obtenção das probabilidades estacionárias foi adoptado o método de replicação/anulação para médias (veja-se, e.g., Law e Kelton [16]), quando os parâmetros não são estacionários, mas são estacionários em ciclos apropriados. Desta forma, como a taxa de entradas é periódica, obteve-se a distribuição estacionária das probabilidades de bloqueio por período.

Também foram realizados testes para a determinação do período inicial a partir do qual se registam os valores da simulação. Geralmente, a determinação do período inicial é complicada devido à inerente variabilidade do processo Y_1, Y_2, \dots . Para isso recorreu-se ao método de Welch (veja-se, e.g., Law e Kelton [16]), que pode ser reproduzido em 4 passos:

1. Realizar n replicações da simulação ($n \geq 5$), cada com m observações (m elevado).

Seja Y_{ij} a i -ésima observação da j -ésima réplica ($j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m$)

2. Seja $\bar{Y}_i = \frac{\sum_{j=1}^n Y_{ij}}{n}$, para $i = 1, 2, \dots, m$. O processo médio $\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \dots$ tem média $E[\bar{Y}_i] = E[Y_i]$ e variância $\text{Var}[\bar{Y}_i] = \frac{\text{Var}[Y_i]}{n}$.

3. Para suavizar as oscilações mais frequentes de $\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \dots$ (mas deixando as oscilações menos frequentes), define-se a média móvel $\bar{Y}_i(w)$ da seguinte forma:

$$\bar{Y}_i(w) = \begin{cases} \frac{\sum_{s=-w}^{s=i} \bar{Y}_{i+s}}{2w+1}, & \text{se } i = w+1, \dots, m-w \\ \frac{\sum_{s=i-(i-1)}^{s=i-1} \bar{Y}_{i+s}}{2i-1}, & \text{se } i = 1, \dots, w \end{cases}$$

4. Representar graficamente $\bar{Y}_i(w)$, para $i = 1, 2, \dots, m-w$, e escolher o período inicial l como o valor de i a partir do qual, os valores de $\bar{Y}_1(w), \bar{Y}_2(w), \dots$ aparentam convergir.

Utilizando este método obteve-se um período inicial de 40.5 horas, correspondente a 9 repetições do período de congestão. O tempo de simulação considerado foi de 175.5 horas correspondendo, para recolha de estatísticas, a 30 repetições do período de congestão. Para cada simulação, obtém-se a média das probabilidades de bloqueio nas 30 repetições do período de congestão, obtendo-se as probabilidades de bloqueio estacionárias por período. Por sua vez, para produzir estimativas independentes, repetiu-se a simulação 20 vezes, obtendo-se como estimativa pontual da probabilidade de bloqueio, a média das 20 repetições.

5.1 Desempenho com/sem estratégia de empréstimo

Consideremos inicialmente o modelo ligado/desligado, ou seja, o modelo de teletráfego onde apenas existe um estado de chamada activo e um estado inactivo. Trata-se de um modelo de teletráfego muito simples, mas que tem a vantagem de, pela sua simplicidade, poder ser usado para inferir facilmente conclusões acerca do desempenho do modelo de partilha de largura de banda. Além disso um bom desempenho do modelo de partilha de largura de banda com este modelo de teletráfego é o primeiro passo para posteriormente considerar um modelo de teletráfego mais evoluído. Os pressupostos considerados na simulação foram:

1. Um troço da auto-estrada seccionada em 12 células, cada uma com comprimento 10 Km e capacidade 1050 kbits/s.
2. A velocidade dos móveis (Km/h) segue uma distribuição triangular simétrica com média 100 e semi-amplitude 20.
3. Baseado em [3] consideramos que o processo de teletráfego é constituído por um estado representando teletráfego em tempo real do tipo contínuo como por exemplo chamadas de voz. Consideramos que a distribuição da duração da chamada é exponencial com média 100 segundos e a largura de banda necessária para servir uma chamada deste tipo é de 16 kbits/s. O tempo de permanência no estado inactivo

é exponencialmente distribuído com média 300 segundos. Consideramos ainda que na entrada da auto-estrada 25% das chamadas surgem no estado de tráfego activo e 75% inactivas.

4. O intervalo de tempo h , o tempo entre estimativas, é de 180 segundos, um intervalo de tempo curto de forma a prevenir alterações súbitas do estado da rede.

Foram construídas várias estratégias para aferir a qualidade do modelo de partilha de largura de banda. Algumas destas estratégias surgiram com o intuito de observar a influência de certas características importantes no modelo, como a direcção do empréstimo, o tipo de estimativas e a avaliação dos pedidos de empréstimos. Para isso, compararam-se cinco estratégias distintas:

- **EE_d**: Modelo onde a estratégia de empréstimo é desactivada. Neste modelo, não existe qualquer medida de controlo que previna a diminuição da qualidade de serviço, sendo uma chamada imediatamente aceite se houver largura de banda disponível na célula.
- **EE_real**: Modelo onde a estratégia de empréstimo se encontra activa e as estimativas da capacidade requerida são calculadas em tempo real. As probabilidades de em h unidades de tempo um móvel se manter activo, efectuar handoff ou realizar uma nova chamada são calculados em tempo real, no sentido em que se baseiam no número exacto de móveis em cada célula nesse instante. Este tipo de abordagem permite a obtenção de estimativas mais precisas.
- **EE**: Modelo onde a estratégia de empréstimo se encontra activa, mas as estimativas da capacidade requerida não são calculadas em tempo real. Ao contrário do modelo **EE_real**, as probabilidades são calculadas previamente com base no número esperado de móveis em cada célula, o que origina estimativas menos precisas.
- **EE_esq**: Modelo idêntico ao modelo **EE_real** mas os empréstimos de largura de banda são efectuados para a esquerda (das células da direita para as células da

esquerda). A comparação deste modelo com o modelo `EE_real` permite averiguar a influência da direcção do empréstimo no desempenho da estratégia.

- **EE_parcial**: modelo idêntico ao modelo `EE_real` mas são permitidos empréstimos parciais, ou seja, se um pedido não pode ser satisfeito, a célula empresta-lhe apenas a largura de banda disponível, não satisfazendo o pedido na totalidade mas satisfazendo-o parcialmente.

Para se aferir o desempenho do modelo de partilha de largura de banda, obtiveram-se três medidas de desempenho: a probabilidade de uma chamada em curso ser bloqueada ao transitar para a célula seguinte (bloqueio de handoff), a probabilidade de uma nova chamada ser rejeitada e a probabilidade de bloqueio de uma chamada (handoff ou nova chamada), que não é mais que a média ponderada entre as duas medidas anteriores. Para averiguarmos qual a estratégia que apresenta o melhor desempenho, iremos comparar as cinco estratégias em cada uma das medidas de desempenho. Posteriormente, iremos aplicar estas estratégias de empréstimo a uma única célula da auto-estrada, tal como é feito em grande parte da literatura (veja-se, e.g., [7] e [23]).

Nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3, comparamos as cinco estratégias, observando as probabilidades de bloqueio obtidas em cada uma delas. Por intermédio destas figuras podemos concluir que:

- A estratégia **EE_esq** apresenta resultados desastrosos. O fraco desempenho desta estratégia é devido aos empréstimos de largura de banda serem realizados para a esquerda. Enquanto a estratégia de empréstimo à direita direcciona os pedidos de largura de banda às células por onde o pico de tráfego já passou, deixando livres as células que no futuro ficarão afectadas pelo congestionamento, a estratégia de empréstimo à esquerda dirige o pedido para as células que ainda não foram afectadas pelo pico de tráfego e por isso têm largura de banda disponível para satisfazer o empréstimo. No entanto, quando o pico de tráfego chega a estas células, elas irão necessitar da largura de banda que emprestaram, limitando seriamente o número de chamadas que podem ser servidas e logo aumentam as probabilidades de bloqueio.

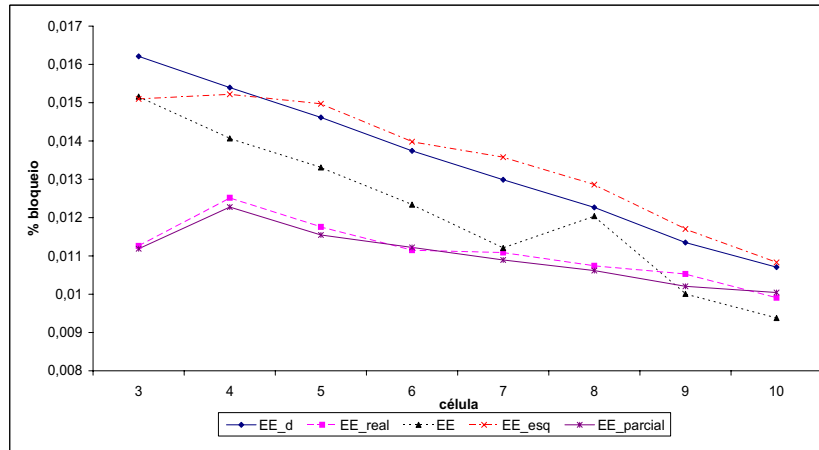


Figura 5.1: Probabilidade de bloqueio por célula.

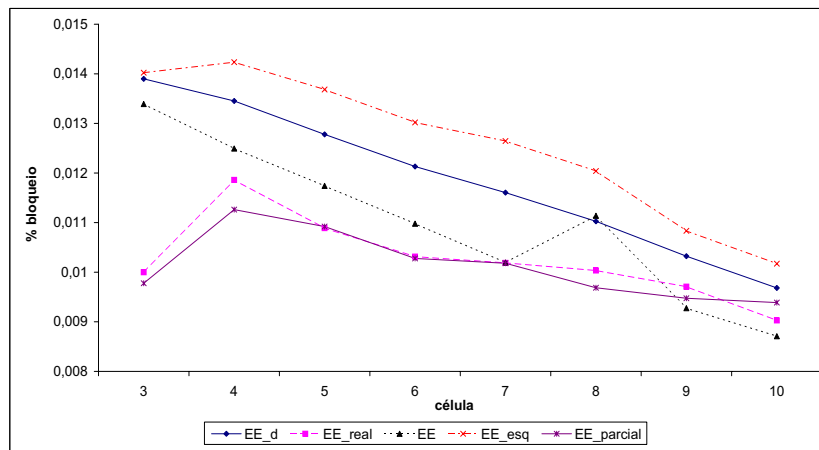


Figura 5.2: Probabilidade de bloqueio de chamadas de handoff por célula.

- A estratégia **EE** apresenta ganhos globais na rede na ordem dos 10%, ou seja, a sua utilização permite à rede reduzir o número de chamadas bloqueadas em cerca de 10%. Um ganho de 10% significa que, com a implementação desta estratégia, em cada 10 chamadas que seriam bloqueadas sem existência de qualquer estratégia

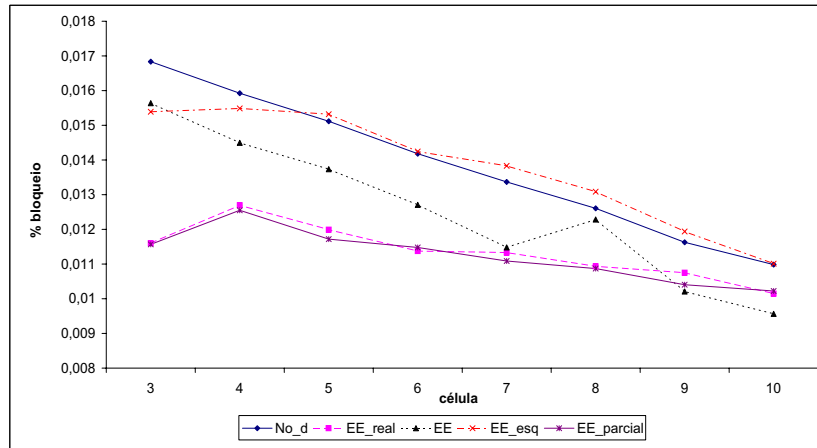


Figura 5.3: Probabilidade de bloqueio de novas chamadas por célula.

de empréstimo, é servida, em média, uma chamada adicional. Esta estratégia é prejudicada por não ter em conta o número real de móveis que se encontram em cada célula, utilizando o número esperado de móveis para realizar a previsão do estado da rede. Por esta razão, as estimativas do estado da rede são menos precisas, originando empréstimos desadequados entre células. O seu desempenho é portanto prejudicado em relação às restantes estratégias. Note-se mais uma vez a importância dos métodos utilizados na monitorização da rede, pois o conhecimento detalhado do estado da rede está directamente relacionado com o bom desempenho do modelo de partilha de largura de banda.

- A célula 3 é a que apresenta maiores benefícios. Isto acontece porque, devido à velocidade dos móveis não ser constante, é nesta célula que o pico de tráfego tem uma maior intensidade. À medida que o pico de tráfego avança na auto-estrada, este vai-se dispersando, aumentando a sua área de afectação e diminuindo a densidade de móveis em cada célula. Além disso, enquanto as restantes células quando efectuem pedidos de empréstimo têm de conjugar as suas necessidades com as necessidades das células vizinhas, a célula 3 direcciona os pedidos de empréstimo para as células 1 e 2, que apenas se limitam a servi-la (pois o cluster só é iniciado na célula 3). Desta

forma, a posição privilegiada da célula 3 na auto-estrada, permite-lhe ter ganhos superiores às restantes células.

- As estratégias **EE_real** e **EE_parcial** são as que apresentam os melhores desempenhos. A diferença principal destas estratégias para a estratégia **EE** é o modo como efectuam a previsão do estado da rede. Como utilizam os valores observados em tempo real do número de móveis em cada célula e em cada estado de teletráfego em vez dos seus valores esperados, a previsão do estado da rede é mais precisa, originando um melhor desempenho. O conhecimento do estado exacto da rede é, portanto, um factor decisivo na implementação de medidas de controlo. Mostra-se desta forma o impacto que métodos adequados e eficientes de previsão têm no desempenho da rede. Observam-se ganhos globais na rede na ordem dos 18% e as células do início da auto-estrada apresentam ganhos na ordem dos 31%. Ou seja, não só todo o troço de células é beneficiado pela aceitação de mais 18% das chamadas que seriam perdidas, como algumas células chegam a reduzir as suas probabilidades de bloqueio em mais de 30%.

A grande vantagem deste modelo de partilha de largura de banda em relação a grande parte dos modelos apresentados na literatura (veja-se, e.g., [7] e [23]), é ser aplicado a todo o troço de células da auto-estrada, em vez de a uma célula particular, o que permite que todas as células do troço da auto-estrada consigam reduzir as probabilidades de bloqueio durante os períodos de congestão.

- Observa-se o decréscimo das probabilidades de bloqueio à medida que se avança ao longo da auto-estrada. Este efeito deve-se ao movimento dos móveis ao longo da auto-estrada e à variabilidade da velocidade, que provocam uma diminuição da intensidade do pico de tráfego ao longo das células, e consequentemente uma diminuição das probabilidades de bloqueio.

Na Tabela 5.1, apresentamos as estimativas das probabilidades de bloqueio e os respectivos limites de confiança a 95% para cada uma das estratégias apresentadas. Podemos concluir que os melhores desempenhos pertenceram às estratégias **EE_parcial** e **EE_real**, e que entre estas duas estratégias não existem diferenças significativas, pelo

que a utilização de uma em detrimento da outra apenas se deve a restrições de ordem prática. Nas figuras 5.4, 5.5 e 5.6, podemos observar uma representação gráfica destes limites de confiança a 95%.

Estimativas das probabilidades de bloqueio no troço de células:			IC a 95%	
			limInf	limSup
total	EE_dir	1.35%	1.33%	1.37%
	No_EE	1.34%	1.32%	1.36%
	EE	1.22%	1.20%	1.24%
	EE_real	1.11%	1.09%	1.13%
	EE_parcial	1.10%	1.07%	1.13%
handoff	EE_dir	1.26%	1.24%	1.28%
	No_EE	1.19%	1.17%	1.20%
	EE	1.10%	1.08%	1.12%
	EE_real	1.03%	1.00%	1.05%
	EE_parcial	1.01%	0.98%	1.04%
novas chamadas	EE_dir	1.38%	1.36%	1.40%
	No_EE	1.38%	1.36%	1.40%
	EE	1.25%	1.23%	1.27%
	EE_real	1.14%	1.11%	1.16%
	EE_parcial	1.12%	1.09%	1.16%

Tabela 5.1: Estimativas das probabilidades de bloqueio e respectivos intervalos de confiança a 95% no troço de células.

Para se comprovar que realmente o efeito de decréscimo das probabilidade de bloqueio ao longo da auto-estrada se deve à variabilidade da velocidade dos móveis, apresenta-se, na Figura 5.7, as probabilidades de bloqueio (de novas chamadas e handoff), considerando agora a velocidade constante e igual a 100 Km/h. A utilização de velocidades constantes, leva a que a densidade de móveis mantenha a sua intensidade ao longo da auto-estrada, sendo por isso mais eficientes as estimativas do estado da rede.

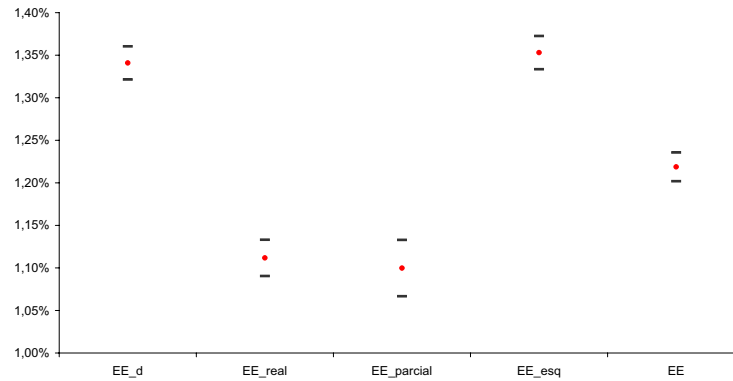


Figura 5.4: Intervalos de confiança a 95% para a probabilidade de bloqueio.

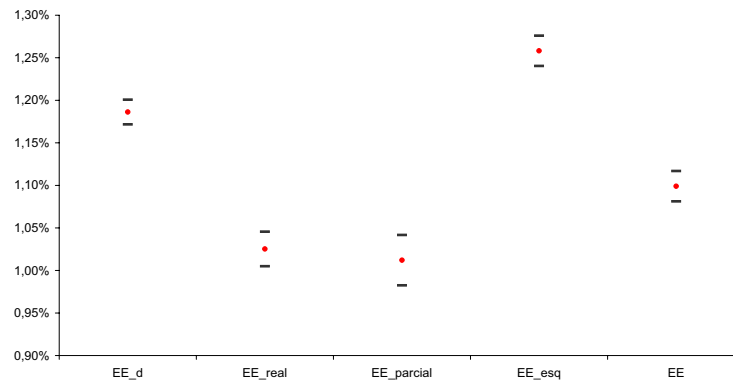


Figura 5.5: Intervalos de confiança a 95% para a probabilidade de bloqueio de chamadas handoff.

Verificamos que em toda a rede se observam ganhos de 24% nas probabilidades de bloqueio, ou seja, cerca de um quarto das chamadas bloqueadas são aceites por implementação do modelo de partilha de largura de banda. Podemos constatar que com a velocidade constante, todas as células apresentam aproximadamente o mesmo ganho, sendo apenas a célula 3 a que apresenta ganhos superiores, pelas razões já apresentadas. A simplificação introduzida por a velocidade ser constante permite um melhor desempenho

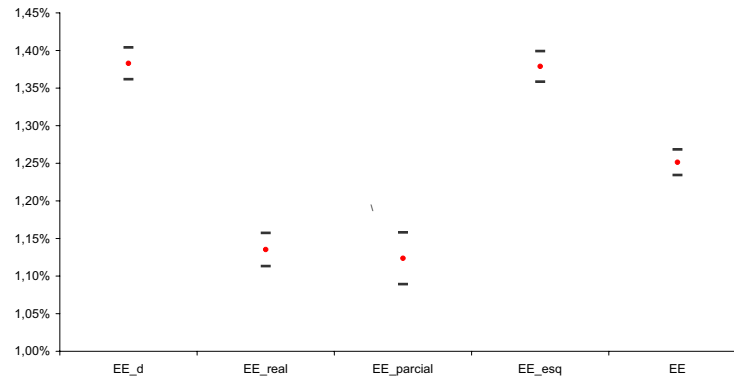


Figura 5.6: Intervalos de confiança a 95% para a probabilidade de bloqueio de novas chamadas.

do modelo de partilha de largura de banda.

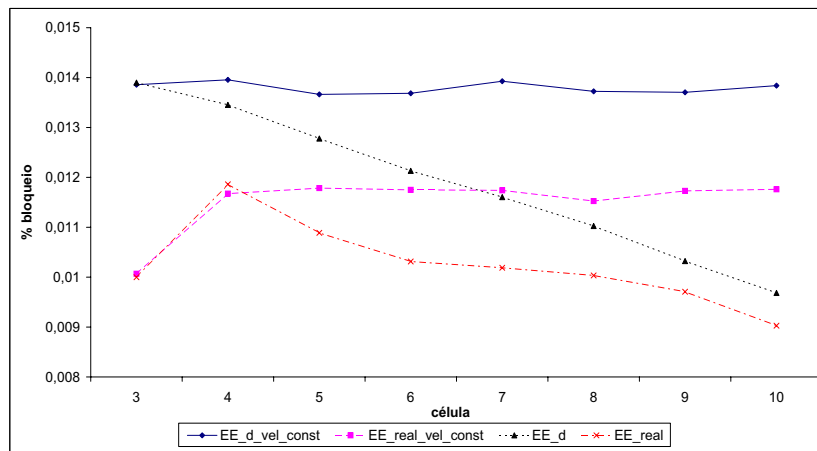


Figura 5.7: Comparação das probabilidades de bloqueio de chamadas de handoff por célula, considerando a velocidade constante (100 Km/h) e com distribuição triangular simétrica (com média de 100 Km/h.)

Como as melhores estratégias foram a **EE_real** e a **EE_parcial**, consideramos a partir de agora apenas estas estratégias para estudo. Consideremos agora o desempenho

do modelo de partilha de largura de banda apenas sobre uma célula da auto-estrada e não sobre toda a rede. Ou seja, apenas uma célula da auto-estrada pode efectuar empréstimo de largura de banda, sendo estes empréstimos direccionados para as duas células à sua esquerda.

Este cenário poderá ter bastante interesse se se pretender que uma célula particular usufrua de condições de excelente qualidade de serviço. Além disso, grande parte dos modelos que são apresentados na literatura focam a avaliação de desempenho em apenas uma célula particular. Construíram-se duas estratégias: **EE_real_cel3** e **EE_real_cel8**, onde os pedidos de empréstimo foram aplicados apenas sobre as células 3 e 8, respectivamente. O objectivo desta análise é exactamente mostrar a adaptabilidade do modelo de partilha de largura de banda que, não obstante ter sido construído para ser aplicado a toda a auto-estrada, é bastante flexível caso se pretenda focar toda a estratégia numa célula particular.

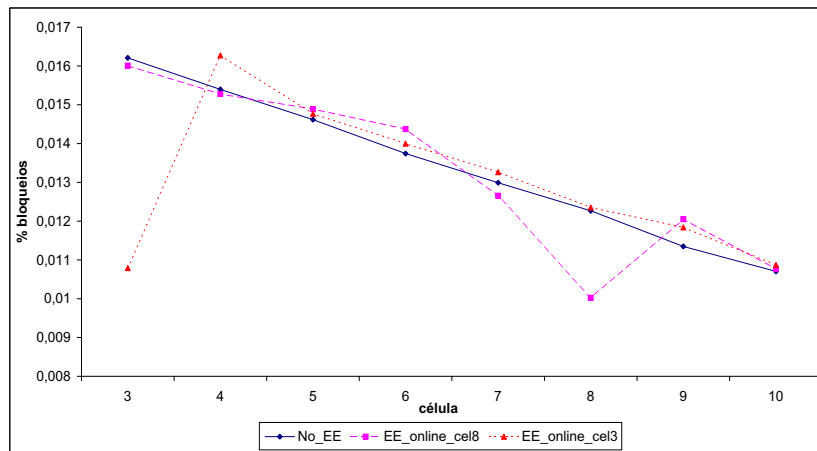


Figura 5.8: Probabilidade de bloqueio por célula com a estratégia de empréstimo activa nas células 3 e 8.

Nas figuras 5.8, 5.9 e 5.10 podemos observar o desempenho destas estratégias. Verificamos que a estratégia **EE_real_cel3**, origina na célula 3 ganhos na ordem dos 36% e a rede apresenta ganhos globais de 3%. Conclui-se assim que ao se centrar toda a estratégia

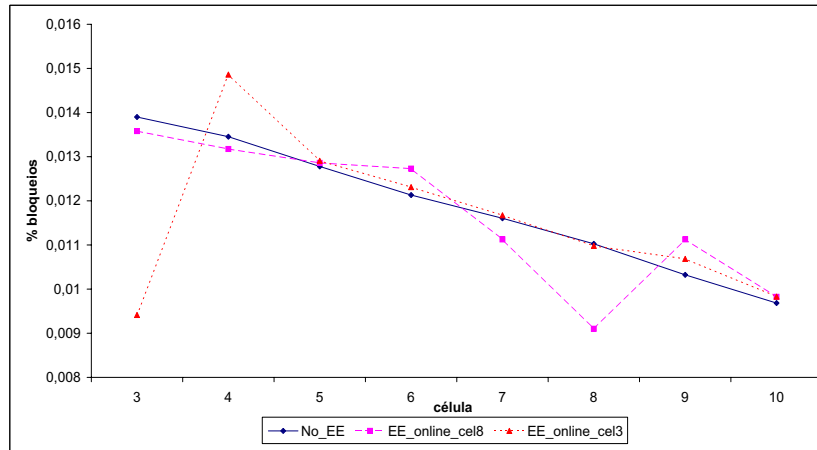


Figura 5.9: Probabilidade de bloqueio de chamadas de handoff por célula com a estratégia de empréstimo activa nas células 3 e 8.

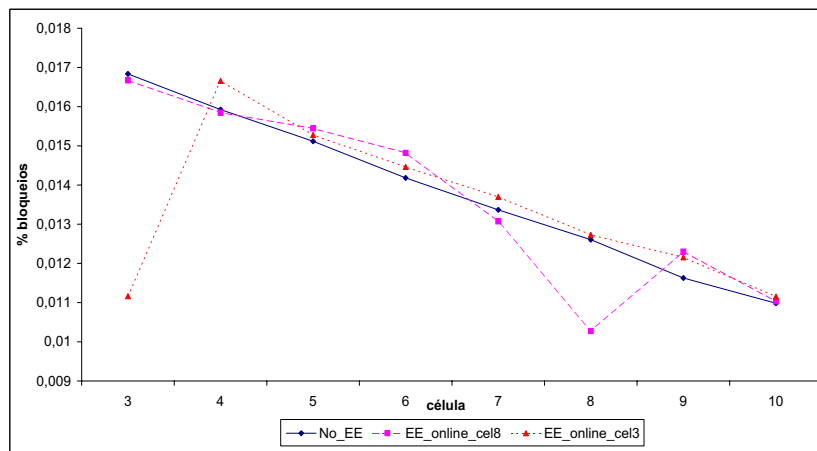


Figura 5.10: Probabilidade de bloqueio de novas chamadas por célula com a estratégia de empréstimo activa nas células 3 e 8.

numa única célula, as restantes células ficam prejudicadas, conseguindo-se contudo ainda uma diminuição das probabilidades de bloqueio em toda a rede na ordem dos 3%. A

célula sob a qual se centraram todos os pedidos de empréstimo aumentou os ganhos em relação aos que se verificaram nas estratégias anteriores, pelo que o objectivo de garantir resultados extraordinários numa célula particular da auto-estrada é atingido.

Em relação à estratégia **EE_real_cel8**, também se verificou na célula 8 uma redução das probabilidades de bloqueio em 19% e um ganho global na rede de 1,1%. Também a célula 8 apresenta ganhos superiores aos que foram observados nas outras estratégias, mas à custa de aumentar ligeiramente as probabilidades de bloqueio nas células vizinhas. Também se verifica que a análise focalizada numa única célula permite que essa célula obtenha reduções muito significativas nas probabilidades de bloqueio.

De salientar, mais uma vez, o facto de apesar do modelo de partilha de largura de banda ter sido construído para ser aplicado em toda a rede, quando se utiliza este modelo apenas numa célula particular, esta célula apresenta ganhos excepcionais, podendo recuperar até um terço das chamadas perdidas sem no entanto comprometer o ganho global da rede.

Finalmente, estudou-se o efeito do tempo entre estimativas no desempenho do modelo de partilha de largura de banda. Para isso, considerou-se a estratégia **EE_real**, mas utilizaram-se diferentes intervalos de tempo entre estimativas. Foram então construídas as estratégias **EE_real_h180**, e **EE_real_h270**, correspondendo, respectivamente, a tempos entre estimativas de 180 e 270 segundos. Os resultados são apresentados nas figuras 5.11 e 5.12.

Pela análise destes gráficos podem-se tirar conclusões bastante interessantes, que vêm ao encontro do que já se tinha concluído analiticamente. Quando a intensidade de tráfego é de tal forma elevada que origine altas taxas de ocupação das células, como acontece nas células do início da auto-estrada, os modelos com tempos entre estimativas mais curtos apresentam os melhores resultados. Contudo, no fim do troço de células verifica-se que todos os modelos têm comportamentos semelhantes, justamente quando o pico de tráfego já diminuiu a sua intensidade e se verifica uma menor taxa de ocupação das células.

Este resultados evidenciam que em condições de elevadas taxas de ocupação das células, uma monitorização mais frequente da rede origina um melhor desempenho do modelo e em condições de baixa taxa de ocupação das células poder-se-á diminuir a frequência

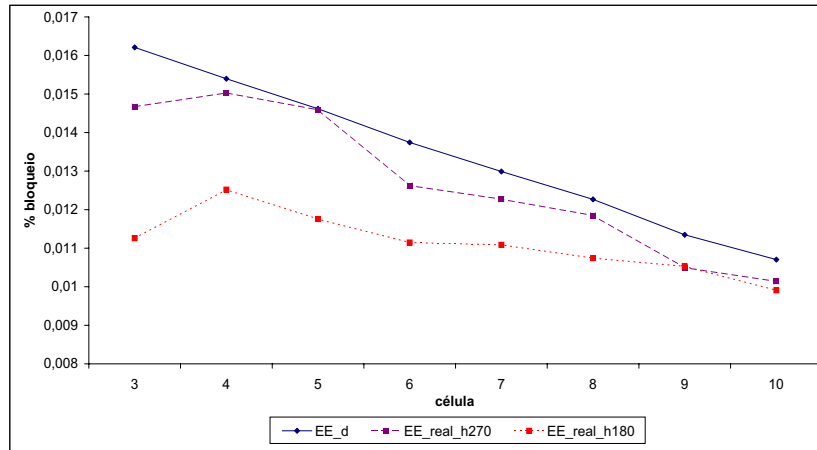


Figura 5.11: Probabilidade de bloqueio por célula, para diferentes valores do tempo entre estimativas.

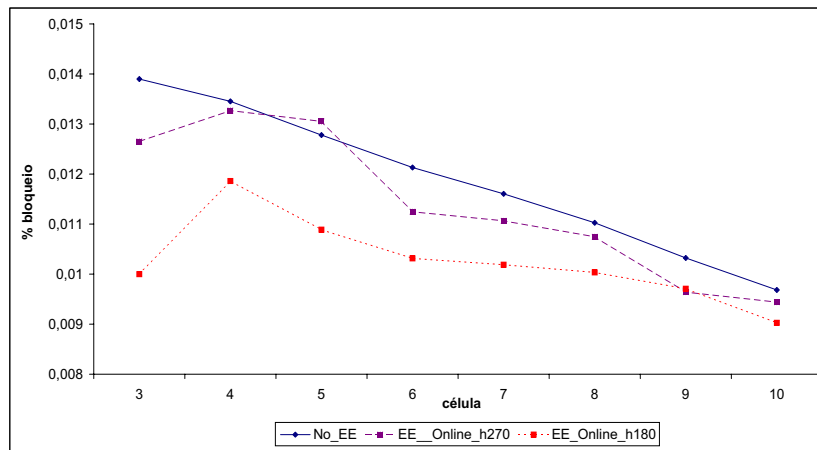


Figura 5.12: Probabilidade de bloqueio de chamadas de handoff por célula, para diferentes valores do tempo entre estimativas.

de monitorização, pois a rede não é prejudicada.

5.2 Desempenho com diferentes classes de tráfego

Finalmente, sendo este trabalho direccionado para a segunda e terceira geração de redes móveis sem fios, apresentamos os resultados provenientes de modelos que suportam diversas classes de tráfego, com diferentes características. Consideremos as mesmas condições que o modelo anterior em relação ao número de células e à velocidade. Contudo, baseado em [3], consideremos agora que o processo de teletráfego é constituído por três estados e duas classes de tráfego. A nova classe de tráfego, a classe 2, considera tráfego em tempo não real, como por exemplo tráfego www. Uma chamada da classe 2 necessita de 64 kbits/s e a sua duração segue uma distribuição exponencial de média 60 segundos. Assumimos que 75% das chamadas são de tráfego em tempo real e 25% são de tráfego em tempo não real. O tempo de permanência no estado inactivo é exponencialmente distribuído com média 300 segundos. A função massa de probabilidade inicial do estado de teletráfego é (0.75, 0.20, 0.05). Na Figura 5.13 podemos observar o diagrama de transições do processo de teletráfego considerado.

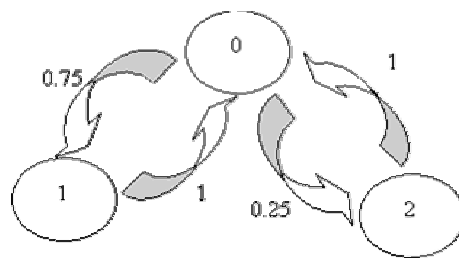


Figura 5.13: Diagrama de transições do processo de teletráfego.

Pela análise das figuras 5.14, 5.15 e 5.16, podemos constatar que existe exactamente o mesmo comportamento quando se incluem diversas classes de teletráfego, mas os ganhos da rede diminuem. Esta diminuição deve-se, fundamentalmente, à diminuição da precisão das estimativas, não só devido ao aumento da variabilidade das estimativas, como também pela inclusão de mais classes de teletráfego. Contudo, os ganhos da rede por utilização da estratégia de empréstimo rondam os 11%, verificando-se para a célula 3 ganhos na ordem dos 20%.

Nota-se além disso ainda um melhor desempenho da estratégia **EE_parcial**, embora

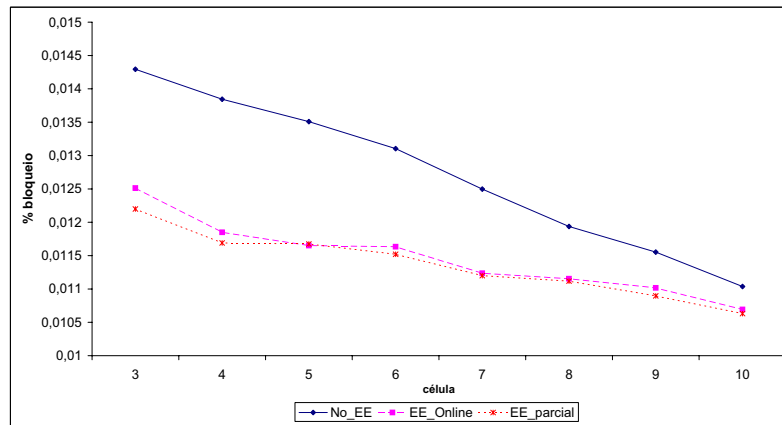


Figura 5.14: Probabilidade de bloqueio por célula, considerando duas classes de tráfego.

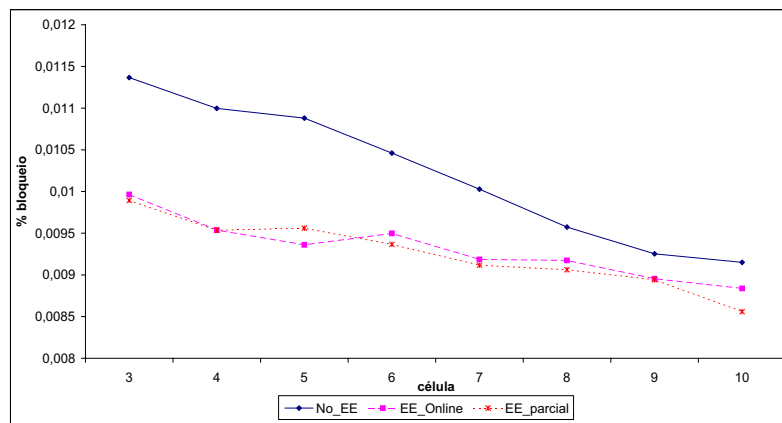


Figura 5.15: Probabilidade de bloqueio de chamadas handoff por célula, considerando duas classes de tráfego.

as estimativas apresentadas não diferem significativamente das obtidas pela estratégia **EE_real**. Desta forma, podemos concluir que, também neste cenário, ambas as estratégias apresentam bons desempenhos. Na Tabela 5.2, apresentamos as estimativas das probabilidades de bloqueio e os respectivos limites de confiança a 95%, para cada uma das estratégias apresentadas.

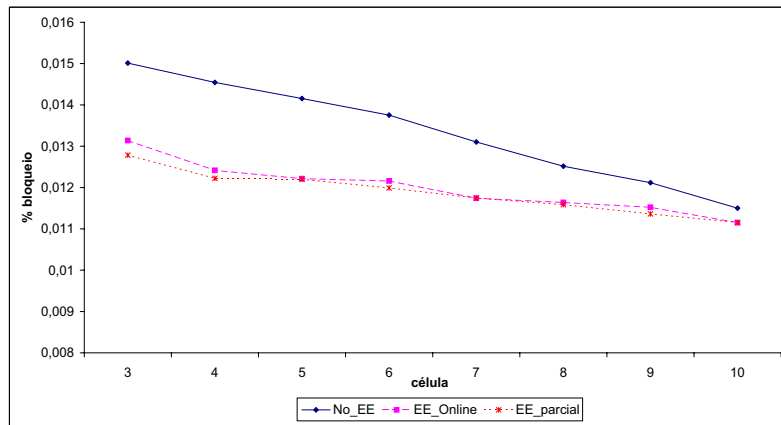


Figura 5.16: Probabilidade de bloqueio de novas chamadas por célula, considerando duas classes de tráfego.

Estimativas das probabilidades de bloqueio:			IC a 95%	
			limInf	limSup
total	No_EE	1.38%	1.36%	1.41%
	EE_real	1.19%	1.16%	1.21%
	EE_parcial	1.17%	1.15%	1.19%
handoff	No_EE	1.16%	1.09%	1.18%
	EE_real	1.00%	0.95%	1.01%
	EE_parcial	0.97%	0.96%	1.04%
novas chamadas	No_EE	1.33%	1.32%	1.35%
	EE_real	1.20%	1.19%	1.22%
	EE_parcial	1.19%	1.18%	1.20%

Tabela 5.2: Estimativas das probabilidades de bloqueio e respectivos intervalos de confiança a 95% no troço de células, considerando duas classes de tráfego.

Capítulo 6

Conclusão e trabalho futuro

Neste trabalho foi proposto um modelo de partilha de largura de banda para prever o estado da rede e responder a alterações significativas dos padrões de qualidade do serviço prestado nas futuras redes de telecomunicações sem fios. Este modelo está orientado para lidar com o problema de ocorrência de períodos de congestão da rede. Foi implementada uma estratégia de empréstimo de largura de banda entre células, que permite que as células menos congestionadas emprestem largura de banda às células que se encontram congestionadas, possibilitando uma utilização eficiente dos recursos da rede e minorando o impacto provocado pelo pico de tráfego.

Para isso, generalizámos o modelo de auto-estrada de Antunes, Pacheco e Rocha [3], considerando um processo de Poisson não homogéneo para descrever o processo de entradas de móveis na auto-estrada. Derivámos então a distribuição transiente do número de móveis em cada célula e em cada estado de teletráfego, concluindo que são variáveis aleatórias de Poisson independentes. Derivámos também a distribuição transiente do processo handoff de uma célula por estado de chamada, concluindo que é um processo de Poisson não homogéneo.

De seguida, construímos o modelo adaptativo de partilha de largura de banda e descrevemos o conjunto de células que num dado instante podem efectuar empréstimos de largura de banda, denominado de cluster. A estratégia de empréstimo entre células é composta por duas fases. Na primeira fase, são efectuadas previsões do estado da rede e, através destas previsões, é determinado o cluster de células. Se o cluster for criado,

avança-se então para a segunda fase da estratégia de empréstimo, que se divide em duas etapas. Na primeira etapa, é actualizada a capacidade efectiva de serviço, calculada a capacidade disponível em cada célula e, através de um algoritmo, são determinados os pedidos de largura de banda entre células. Na segunda etapa, o sucesso do empréstimo é avaliado, são calculadas as devoluções de largura de banda por parte das células que não efectuaram um pedido de empréstimo e é actualizada a largura de banda emprestada entre células.

Este modelo está delineado de forma a acompanhar os picos de tráfego ao longo da auto-estrada, sendo suficientemente flexível para, desde que haja largura de banda disponível nas células abrangidas pelo cluster, o empréstimo seja bem sucedido, permitindo reduzir o bloqueio provocado pelo pico de tráfego.

Foram derivados resultados para estimar o estado da rede. Obtivemos, para cada célula e para cada estado de chamada, as probabilidades de, após um curto período de tempo, um móvel transitar de célula ou realizar uma nova chamada. Como estas probabilidades necessitam da densidade espacial do número de móveis em cada célula, derivámos a distribuição espacial de móveis na auto-estrada em cada estado de teletráfego num instante fixo e mostrámos que também é um processo de Poisson não homogéneo. Por derivação obtivemos, para um instante fixo, a densidade de móveis num ponto da auto-estrada. Com estes resultados, foi possível efectuar predições do estado da rede, tendo sido desenvolvidos dois métodos. Obtivemos a estimativa exacta do estado da rede após h unidades de tempo, condicional ao conhecimento do número de móveis em cada célula e em cada estado de teletráfego no instante t . Contudo esta estimativa exige grandes recursos computacionais, não sendo por isso adequada para ser utilizada em tempo real. Desenvolvemos então uma distribuição aproximada, computacionalmente menos exigente, e portanto mais adequada para implementar nas futuras redes de telecomunicações, recorrendo-se a aproximações à distribuição Normal para estimar o estado da rede num instante futuro.

Estudámos analiticamente o efeito de algumas características do modelo no número de novas chamadas e no número de móveis que transitam de célula após um curto intervalo de tempo. Verificou-se que o tamanho da célula não tem qualquer influência no número de

transições, no entanto, tal como seria de esperar, o aumento do tamanho da célula origina um aumento do número de móveis em cada célula e, conseqüentemente, um aumento do número de móveis inactivos na célula e de novas chamadas iniciadas em intervalos de tempo fixos.

Os tempos médios de duração das chamadas também são um factor importante na adopção de medidas de controlo da rede. Quanto menor for o tempo médio de duração das chamadas, mantendo fixo o tempo médio entre duas chamadas consecutivas, menor será o número de móveis que num intervalo de tempo fixo realizam novas chamadas. Neste sentido, o conhecimento do número de móveis em cada estado e o conhecimento do tempo médio de duração de cada tipo de chamada têm uma grande influência na adopção de medidas de controlo para manutenção da qualidade de serviço da rede.

Finalmente verificámos que o número de móveis inactivos em cada célula tem um papel importante na precisão das estimativas, logo é necessário à rede não só ter conhecimento dos móveis activos em cada célula, mas também dos móveis inactivos.

Finalmente foram obtidas simulações para validar os resultados analíticos e, principalmente, para avaliar o desempenho da estratégia de empréstimo. Para isso, desenvolvemos alguns modelos, com ligeiras variações entre eles, mas suficientemente pertinentes para se poderem tirar conclusões acerca da melhor estratégia. A análise de desempenho incidiu apenas sobre as probabilidades de bloqueio de uma nova chamada, das probabilidades de terminação da ligação (bloqueio de handoff) e do bloqueio de uma chamada (handoff ou nova chamada). As simulações originaram as seguintes conclusões:

- A precisão da estimativa da capacidade requerida é um factor importante no desempenho da estratégia de empréstimo.
- As estratégias que estimam a capacidade requerida em tempo real, ou seja, as estratégias que têm em conta o número exacto de móveis em cada célula, apresentam os melhores desempenhos por produzirem estimativas de melhor qualidade do estado futuro da rede.
- A direcção do empréstimo também é um factor importante no desempenho do modelo. A direcção dos empréstimos deverá ser sempre no sentido do movimento do

tráfego, pois desta forma, os empréstimos não desguarnecem as células que irão receber o pico de tráfego.

- O modelo de partilha de largura de banda apresentou um bom desempenho na presença de períodos de congestão, sendo eficaz na previsão e no controlo da rede. Na presença de um período de congestão não afectando mais de duas células, verificase um melhor desempenho permitindo ao operador do serviço móvel diminuir acen-tuadamente as probabilidades de bloqueio. As células do início do troço de células da auto-estrada chegam a ter uma redução das probabilidades de bloqueio superior a 30%, enquanto o ganho global da rede é na ordem dos 18%.
- Se o processo de teletráfego incluir diferentes classes de tráfego, o modelo também apresenta um bom desempenho, verificando-se diminuições nas probabilidades de bloqueio em toda a rede na ordem dos 11% e na célula inicial - a célula 3 - na ordem dos 20%.
- Quando a velocidades dos móveis não é constante, a intensidade do pico de tráfego vai diminuindo à medida que os móveis avançam na auto-estrada. Desta forma, a célula 3 é a célula do início do troço de células que apresenta as probabilidades de bloqueio mais baixas, visto que esta célula tem à sua disposição as células 1 e 2, que apenas se limitam a emprestar a largura de banda disponível.
- Embora a estratégia de empréstimo tenha sido concebida para toda a rede, se for aplicada a apenas uma célula, surgem ganhos consideráveis. Não só em toda a rede se consegue garantir uma diminuição das probabilidades de bloqueio, como nas células afectadas o operador consegue servir até 36% das chamadas que seriam perdidas para uma célula que se encontre no início da auto-estrada, e na ordem de 18% para uma célula que se encontre situada no fim do troço da auto-estrada, tendo portanto um grande impacto qualitativo no serviço móvel.
- A utilização de intervalos entre estimativas adequados também provou ser um factor decisivo no desempenho do modelo. Quando a taxa de ocupação da rede é elevada,

é necessária a utilização de tempos entre estimações curtos, para melhor prevenir as alterações súbitas do estado da rede.

Existe ainda muito trabalho de interesse que poderá ser desenvolvido no futuro, não só pela existência de algumas limitações no modelo apresentado, como pela análise de novas características e introdução de novas metodologias. Deixam-se algumas das propostas que poderão realizar-se no futuro:

- No que concerne à estrutura da auto-estrada, considerar múltiplas entradas e saídas e dois sentidos de tráfego.
- Alargar o modelo ao caso bidimensional, onde os utilizadores se poderão mover em qualquer direcção no plano, cobrindo uma secção de ruas de uma cidade.
- Considerar a existência de vários clusters simultâneos no troço de células desde que haja uma distância mínima entre eles de forma a evitar interferências. Desta forma possibilitar-se-ia a prevenção de períodos de congestão simultâneos em diferentes locais da rede.
- Introdução de hipóteses mais realistas na mobilidade dos móveis, no sentido de adaptar o modelo às necessidades dos operadores das futuras redes de telecomunicações móveis. A possibilidade de alterar certos pressupostos relativos à velocidade dos móveis, permitindo velocidades variáveis ao longo da auto-estrada, poderá tornar o modelo mais apelativo e mais adaptado à realidade, como por exemplo, considerar a velocidade de um móvel dependente da intensidade de tráfego no instante de entrada na auto-estrada.

Outra melhoria pode ser conseguida trabalhando com medidas de posição não absolutas, nomeadamente, a posição x poderia passar a ser, e.g., o ponto da auto-estrada que demorava a ser atingido um tempo com distribuição igual ao que demoraria a percorrer x Km em percurso plano e em linha recta.

- Inclusão de medidas preventivas de bloqueios de handoff, como um algoritmo de controlo de admissão de chamadas (CAC), poderá salientar ainda mais a importância

das medidas de controlo nas futuras redes de telecomunicações. Sendo as chamadas handoff aquelas que mais importância têm para o operador do serviço móvel, a integração de um modelo de partilha de largura de banda com um CAC poderá originar um aumento na qualidade de serviço das chamadas.

- Consideração de tempos entre estimativas dinâmicos, que se adaptem às necessidades reais da rede. Em situações de tráfego intenso a utilização de tempos entre estimativas mais curtos origina melhores desempenhos e, em situações de tráfego ligeiro, a utilização de tempos entre estimativas maiores, não só é adequado, como diminui os custos inerentes à implementação da estratégia de empréstimo.
- Introdução de outras medidas de avaliação do desempenho da rede além das probabilidades de bloqueio, como por exemplo, a qualidade da ligação. Esta medida poderá ser avaliada pela inclusão de chamadas com taxas de transmissão dinâmicas.

Bibliografia

- [1] Antunes, N. (2001). *Modeling and Analysis of Wireless Networks*. Tese de Doutorado. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- [2] Antunes, N., Rocha, R., Pinto, P. e Pacheco, A. (1998). Impact of next-generation wireless networks requirements on teletraffic modelling. *Interoperable Communication Network*, 1(2-4): 706-715.
- [3] Antunes, N., Pacheco, A. e Rocha, R. (2000). Traffic modelling for broadband wireless networks: The highway scenario. *Advances in Performance Analysis*, 3(2), p.109-136.
- [4] Antunes, N., Pacheco, A. e Rocha, R. (2002). An integrated traffic model for multimedia wireless networks. *Computer Networks*, 38(1):25-41.
- [5] Das, S. K., Sen, S. K. e Jayaram, R. (1996). A dynamic load balancing scheme for channel assignment using selective borrowing in cellular mobile environment. *Proceedings of IEEE/ACM Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 73-84.
- [6] Das, S. K., Sen, S. K. e Jayaram, R. (1997). A structured channel borrowing scheme for dynamic load balancing in Cellular Networks. *Proceedings of 17th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems*, pp. 116-123.
- [7] Das, S. K., Sen, S. K. e Jayaram, R. (1998). A novel load balancing scheme for the tele-traffic hot spot problem in cellular networks. *Wireless Networks*, 1:37-45.
- [8] El-Dolil, S., Wong, W. e Steele, R.(1989). Teletraffic performance of highway microcells with overlay macrocell. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 7(1):71-78.

-
- [9] Feller, W. (1971). *An Introduction to Probability Theory and Applications*, Volume II. John Wiley & Sons, Nova Iorque, Segunda edição.
- [10] Geier, J. (1996). *Wireless Networking Handbook*. New Riders Publishing, Indianapolis.
- [11] Guérin, R., Ahmadi, H. e Naghshineh, M. (1991). Equivalent capacity an its application to bandwidth allocation in high-speed networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1:329-343
- [12] Hac, A., e Armstrong, A. (2001). Resource allocation scheme for QoS provisioning in microcellular networks carrying multimedia traffic. *International Journal of Network Management*, 11: 277-307.
- [13] Kaaranen, H., Ahtiainen, A., Laitinen, L., Naghian, S. e Niemi, V. (2001). *UMTS Networks. Architecture, Mobility and Services*. John Wiley & Sons, Chichester.
- [14] Kingman, J.F.C. (1993). *Poisson Processes*. Oxford University Press, Nova Iorque.
- [15] Kulkarni, V. G. (1999). *Modelling, Analysis, Design, and Control of Stochastic Systems*. Springer Texts in Statistics, Londres.
- [16] Law, A. e Kelton, W. D. (1991). *Simulation Modelling and Analysis*. McGraw-Hill Book Co., Nova Iorque, Segunda edição.
- [17] Leung, K., Massey, W. A. e Whitt, W. (1994). Traffic models for wireless communications networks. *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, 12(8):1353-1364.
- [18] Lindsay-Stewart, A., Lee, W., Schulz, M. e Xu, C. (2001). Incremental capacity gains for high blocking sites using dynamic channel sharing. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 50(1):1-11.
- [19] Massey, W. A. e Whitt, W. (1994). A stochastic model to capture space and time dynamics in Wireless Communication Systems. *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, 8:541-569.

-
- [20] Meyer, R. (1998). *PARSEC User Manual*. UCLA Parallel Computing Laboratory.
- [21] Pacheco, A. e Prabhu, N. U. (1996). A Markovian storage model. *The Annals of Applied Probability*, 6(1):76-91.
- [22] Redl, S. M., Weber, M. K. e Oliphant, M. W. (1998). *GSM and Personal Communications Handbook*. Artech House Publishers, Boston.
- [23] Ule, A. e Boucherie, R. (2001). Adaptive dynamic channel borrowing in road-covering mobile networks, Memorandum No. 1589, Faculty of Mathematical Sciences, Universidade de Twente.