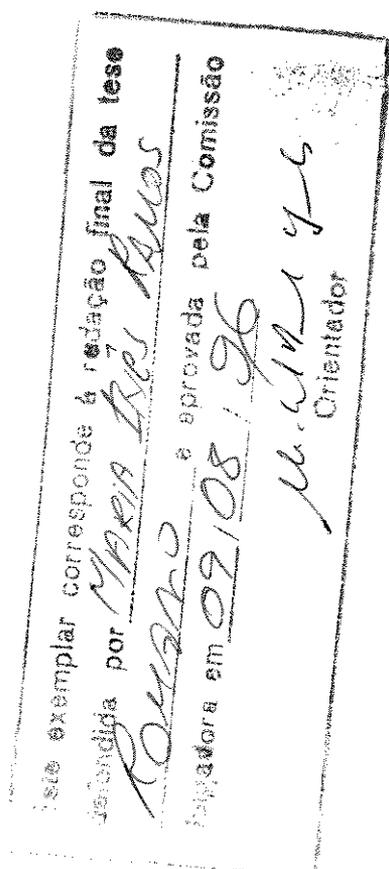


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE COMUNICAÇÕES

MODELAGEM DE TRÁFEGO E VARIAÇÃO DO LIMIAR DE BLOQUEIO PARA TRÊS CAMINHOS DE RÁDIO EM COMUNICAÇÕES MÓVEIS

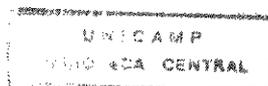


Autor : *Maria Inês Ramos Romano*

Orientador : Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub

Tese de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Elétrica da
Universidade Estadual de Campinas,
como parte dos requisitos exigidos
para a obtenção do título de *Mestre
em Engenharia Elétrica*

Agosto/1996



96.00094

UNIDADE BC
 N.º CHAMADA:
TUNICAMP
R662m
 V. Ex.
 T. MPD BC/ 29155
 PROC. 667/96
 C D
 PREÇO R\$ 11,00
 DATA 27/11/96
 N.º CPD.
 CM.0009505A-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
 BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

R662m

Romano, Maria Inês Ramos

Modelagem de tráfego e variação do limiar de bloqueio para três caminhos de rádio em comunicações móveis / Maria Inês Ramos Romano.--Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Michel Daoud Yacoub.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistemas de comunicação móvel. 2. Telecomunicações - Tráfego. 3. Tráfego telefônico. 4. Markov, Processos de. I. Yacoub, Michel Daoud. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em primeiro lugar ao meu orientador, Professor Michel Daoud Yacoub, que com seu apoio, amizade e confiança tornou simples a realização dessa tese.

Em seguida, quero agradecer a toda minha família, em particular a meus pais e meus sogros e de uma maneira bem especial a João Marcos, meu marido, e a meus filhos Miriam, Teresa, Filipe, Débora, Beatriz e Marcelo que são um estímulo contínuo para o meu crescimento pessoal.

Quero agradecer também a nossos amigos e a todos que de alguma forma contribuíram para a realização dessa tese.

E, finalmente meus agradecimentos à Elza Aoki e ao Juracy Gomes Ferreira que com muito capricho e boa vontade trabalharam na digitação e nos desenhos deste trabalho.

RESUMO

Algumas estratégias de encaminhamento alternativo de tráfego em sistemas rádio móveis exploram o fato de o assinante próximo à fronteira entre células ter comunicação adequada com a estação base vizinha, além da sua própria estação. De fato, estudos teóricos e medidas de campo mostram que uma considerável proporção do tráfego com acesso a uma segunda célula pode também se comunicar com uma terceira.

Este trabalho de tese explora este atributo e propõe um modelo de tráfego onde assinantes com acesso a duas ou três estações rádio base sejam direcionados convenientemente para uma ou outra célula de acordo com as regras de decisão da estratégia adotada.

Em particular, a estratégia estudada é a Variação do Limiar de Bloqueio. O processo de tráfego é modelado utilizando-se a Cadeia de Markov, através do Processo de Nascimento e Morte tridimensional aplicado a três células. O desempenho do sistema é avaliado através de análise numérica e alguns casos particulares podem ser tratados pela fórmula Erlang-B.

Verifica-se, de uma maneira geral, que o uso de um terceiro caminho de rádio, ao invés de dois apenas, pode melhorar o desempenho de tráfego do sistema. A melhora é mais sensível no caso em que o tráfego é desbalanceado.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	1
1.1. RÁDIO MÓVEL CELULAR	1
1.2. ALGORITMOS DE ALOCAÇÃO DE CANAIS	5
1.3. FUZZY CELL BOUNDARIES OU CÉLULAS CUJAS FRONTEIRAS SE SOBREPÕEM	6
1.4. CONCLUSÃO	10

CAPÍTULO 2

VARIAÇÃO DO LIMIAR DE BLOQUEIO PARA TRÊS CÉLULAS	11
2.1. INTRODUÇÃO	11
2.2. VARIAÇÃO DO LIMIAR DE BLOQUEIO PARA DUAS CÉLULAS	12
2.3. VARIAÇÃO DO LIMIAR DE BLOQUEIO PARA TRÊS CÉLULAS	15
2.3.1. Situação 1 : $N_1 \geq L$; $N_2 \geq L$; $N_3 \geq L$ e $N_1 > N_2 > N_3$	18
2.3.2. Situação 2 : $N_1 = N_2 = N_3 \geq L$	18
2.3.3. Situação 3 : $N_1, N_2, N_3 \geq L$ e $N_1 > N_2 = N_3$	19
2.3.4. Situação 4 : $N_1, N_2, N_3 \geq L$ e $N_1 = N_2 > N_3$	20
2.3.5. Situação 5 : $N_1 \geq L$, $N_2 < L$, $N_3 < L$ e $N_2 > N_3$	21
2.3.6. Situação 6 : $N_1 \geq L$, $N_2 = N_3 < L$	21
2.3.7. Situação 7 : $N_1, N_2 \geq L$, $N_3 < L$ e $N_1 > N_2$	22
2.3.8. Situação 8 : $N_1 = N_2 \geq L$, $N_3 < L$	22
2.3.9. Situação 9 : $N_1, N_2, N_3 < L$	23
2.4. CONCLUSÃO	24

CAPÍTULO 3

MODELO DE TRÁFEGO PARA O SISTEMA DE TRÊS CÉLULAS	25
3.1. INTRODUÇÃO	25

3.2. FLUXOS DE TRÁFEGO	26
3.3. TRÁFEGO FLEXÍVEL.....	27
3.4. DESBALANCEAMENTO DE TRÁFEGO.....	29
3.5. OS FLUXOS DE TRÁFEGO E OS PARÂMETROS DO SISTEMA	30
3.6. MEDIDA DE DESEMPENHO	32
3.7. DESBALANCEAMENTO GLOBAL DO SISTEMA	32
3.8. CONCLUSÕES	40

CAPÍTULO 4

PROCESSO DE MARKOV PARA TRÊS CÉLULAS..... 41

4.1. INTRODUÇÃO	42
4.2. PROCESSO DE NASCIMENTO E MORTE PARA UMA CÉLULA	42
4.3. PROCESSO DE NASCIMENTO E MORTE PARA DUAS CÉLULAS.....	44
4.4. PROCESSO DE NASCIMENTO E MORTE PARA TRÊS CÉLULAS.....	46
4.5. TAXAS DE NASCIMENTO E MORTE	49
4.5.1. Taxa de Morte.....	49
4.5.2. Taxa de Nascimento	49
4.5.2.1. Estratégia 1	50
4.5.2.2. Estratégia 2	55
4.5.2.3. Estratégia 3	58
4.6. MEDIDAS DE DESEMPENHO	61
4.7. MÉTODOS DE SOLUÇÃO.....	63
4.7.1. Quando Não há Flexibilidade	63
4.7.2. Quando a Flexibilidade é Total	64
4.7.3. Métodos Computacionais para o Caso Geral.....	64
4.8. CONCLUSÕES	66

CAPÍTULO 5

RESULTADOS..... 68

5.1. INTRODUÇÃO	68
5.2. BLOQUEIO MÉDIO VERSUS FLEXIBILIDADE	70
5.2.1. Sistema Balanceado.....	70
5.2.2. Sistema Desbalanceado ($\beta = 0,5$).....	72
5.2.2.1. Comparação entre as estratégias.....	72
5.2.2.2. Introdução do terceiro caminho no tráfego flexível	75

5.2.2.3. Comparação entre os diversos limiares para a estratégia 2.....	75
5.3. BLOQUEIO MÉDIO VERSUS DESBALANCEAMENTO.....	76
5.3.1. Bloqueio Médio Versus Desbalanceamento para a Estratégia 2.....	77
5.3.2. Introdução do Terceiro Caminho no Tráfego Flexível.....	78
5.3.3. Comparação entre as Três Estratégias.....	79
5.4. BLOQUEIO MÉDIO VERSUS TRÁFEGO.....	80
5.4.1. Sistema Balanceado.....	80
5.4.2. Sistema Desbalanceado ($\beta = 0,5$).....	82
5.5. CONCLUSÃO.....	86

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES.....	88
------------------------	-----------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
--	-----------

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Este capítulo introduz os principais conceitos envolvendo sistemas rádio móvel celular. Descreve ainda algumas técnicas de alocação de canais e conjetura sobre os benefícios potenciais do uso do tráfego disponível nas fronteiras entre células, sendo este último o foco deste trabalho.

1.1. RÁDIO MÓVEL CELULAR

Atualmente, quando pensamos em telefonia móvel, queremos um sistema que ofereça todas as facilidades da telefonia fixa, com a vantagem adicional da mobilidade. Sendo assim, os assinantes móveis podem se comunicar entre si ou com assinantes fixos (e vice-versa), o que envolve a conexão com a rede telefônica pública.

O sistema rádio móvel é constituído de três componentes básicos: a estação móvel, a estação rádio base e a central de comutação de rádio móvel. A estação móvel, que tanto pode ser uma unidade móvel instalada no carro como um modelo portátil, comunica-se por meio de rádio com a estação rádio base, a qual se conecta de maneira fixa a uma central telefônica.

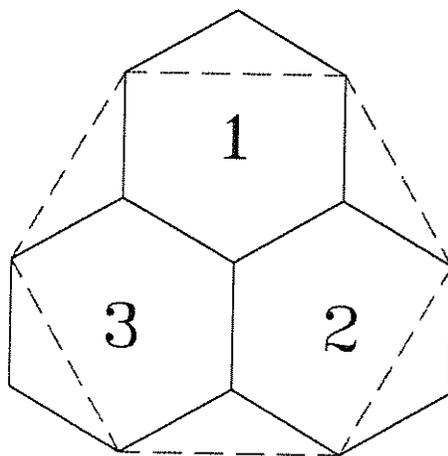
O sistema móvel convencional (pré-celular) apresentava sua expansão limitada pela escassez de espectro de frequências disponíveis. Em meados do nosso século, a "Bell Telephone Laboratories" propôs a idéia revolucionária no campo das comunicações móveis, que é a da reutilização da frequência: se um canal de uma certa frequência cobre uma dada área, então a mesma frequência poderá ser reutilizada para cobrir uma outra área. Cada uma dessas áreas constitui uma *célula*. As células que usam a mesma frequência portadora são

chamadas *co-células*. Elas são colocadas distante o suficiente uma da outra de forma que a interferência co-canal fique dentro dos limites desejados. Com esse novo conceito, uma região que antes era servida por uma estação base no sistema móvel convencional, agora é dividida em várias células, cada uma delas com sua própria estação base e seu conjunto de canais.

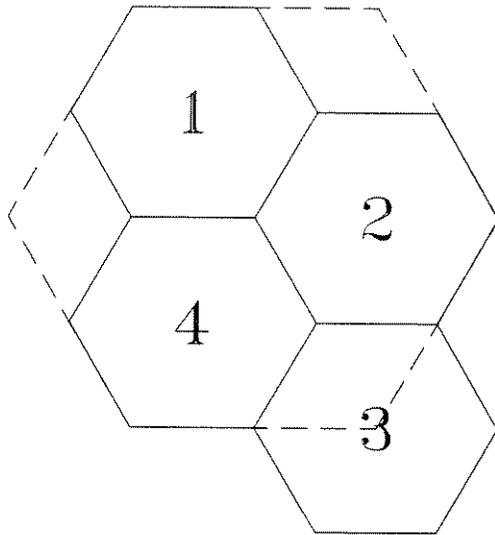
Como a densidade de telefones móveis é muito variável entre o centro das cidades e a periferia, a dimensão das células e o número de canais variam para acomodar as diferentes demandas de tráfego. Contudo, se comparadas com os sistemas convencionais, as células são muito pequenas, sendo que os sistemas celulares estão tendendo às microcélulas.

O formato das células não é importante. O círculo seria a configuração óbvia, se fossem considerados apenas aspectos de propagação de uma antena omnidirecional. Contudo, como um plano preenchido com círculos apresentará áreas de sobreposição (overlaps) ou vazios, utilizamos polígonos regulares, como triângulos equiláteros, quadrados ou hexágonos. O hexágono regular é o formato mais conveniente, pois é o que mais se aproxima do círculo.

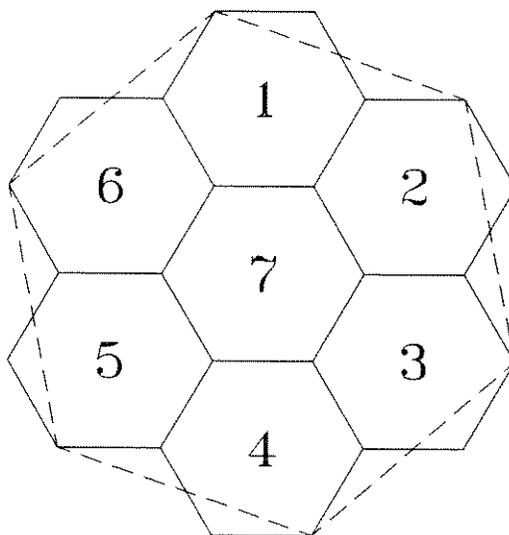
Um grupo de células onde todos os canais disponíveis do sistema são utilizados se chama "cluster". O sistema, então, é composto de vários "clusters" para se atingir a área de cobertura desejada. Um mesmo canal pode ser usado em clusters diferentes. O número de células por cluster determina o padrão de repetição. Devido a limitações geométricas (pois em cada cluster deve caber um número inteiro de células e não deve haver sobreposição ou vazios entre os clusters), só certos padrões de repetição são usados, os mais comuns tendo 3, 4, 7 ou 12 células por cluster (Figura 1.1). Quanto menor o padrão de repetição, maior o número de canais por célula, correspondendo a um sistema com maior capacidade de tráfego. Por outro lado, quanto menor o padrão de repetição, menor a distância entre co-células, correspondendo a uma maior interferência co-canal.



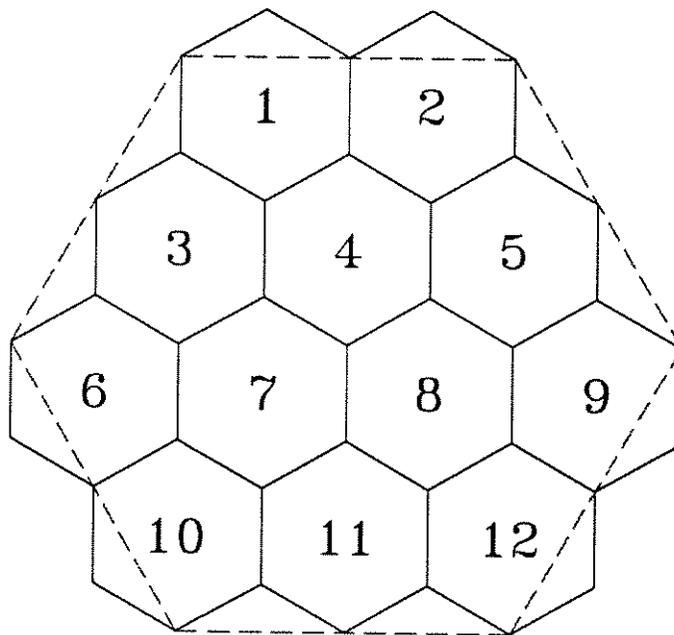
a) Cluster com 3 células



b) Cluster com 4 células



c) Cluster com 7 células



d) Cluster com 12 células

Figura 1.1 - Clusters mais comuns.

Além da interferência co-canal, podemos ter também a interferência de canal adjacente. Embora os equipamentos sejam projetados para selecionar apenas os canais desejados, cortando as frequências adjacentes, existem muitas situações em que os canais adjacentes podem causar interferência. Uma delas, por exemplo, ocorre quando duas estações móveis usando canais adjacentes transmitem para a estação base de uma curta e de uma longa distância, respectivamente.

Vamos agora descrever rapidamente os três componentes básicos de um sistema de rádio móvel: a estação móvel, a estação rádio base e a central de comutação (Figura 1.2).

- **MS ("Mobile Station")** - é a estação móvel, o equipamento terminal do assinante.
- **BS ("Base Station")** - é a estação rádio base que contém o equipamento rádio transmissor/receptor, a unidade de interface com a central de comutação e a torre com as antenas.
- **MSC ("Mobile Switching Center")** - é a central de comutação e controle dos canais de telefonia móvel. O MSC constitui o ponto de interconexão da rede móvel celular com a central da telefonia fixa (PSTN - "Public Switched Telephone Network").

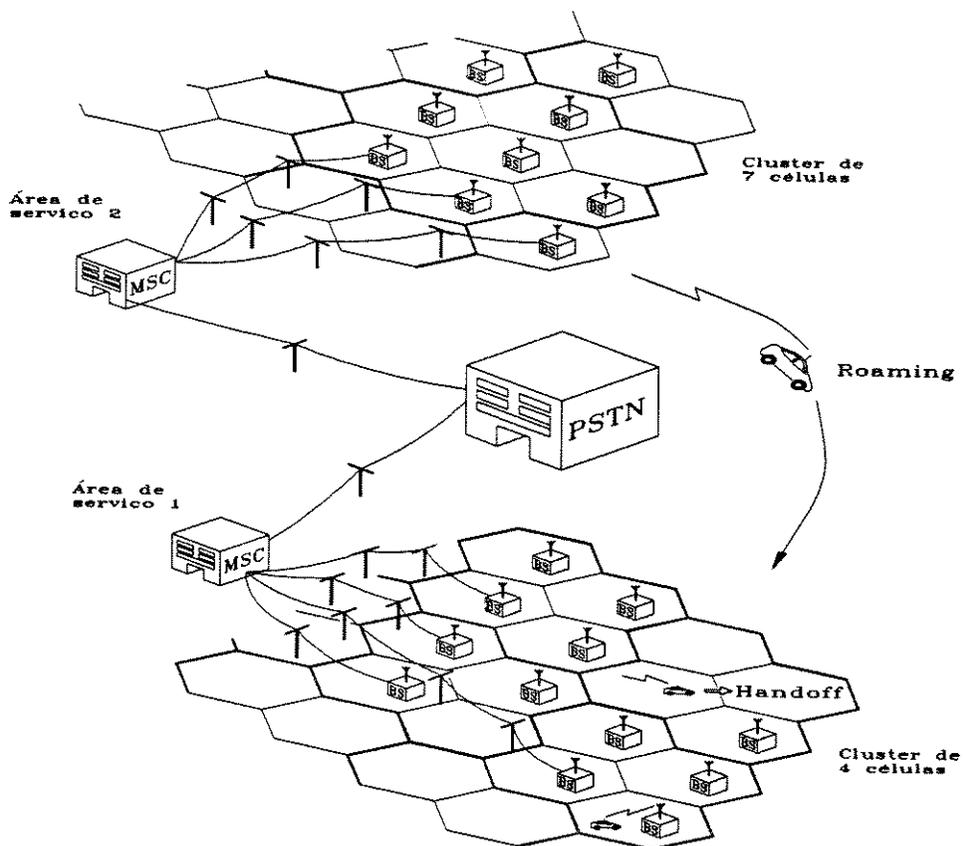


Figura. 1.2 - Componentes básicos de um sistema rádio-móvel.

Chamamos "hand-off" ao processo de transferência de canal quando um móvel passa de uma célula a outra, na fase de conversação. Como a chamada já estabelecida não deve ser interrompida, mudanças de canais são transparentes para o usuário.

1.2. ALGORITMOS DE ALOCAÇÃO DE CANAIS

O objetivo do rádio móvel celular é proporcionar ao assinante, que já está habituado à qualidade da rede telefônica fixa, a flexibilidade. De acordo com as especificações mais aceitas, a probabilidade de um assinante ter a sua ligação bloqueada (probabilidade de bloqueio) durante a hora de maior movimento deveria ser mantida abaixo de 2%. Na verdade, o valor 5% é aceitável, mas há sistemas trabalhando com 10% ou mais.

Tendo em vista uma alocação mais eficiente dos canais em cada célula para um melhor desempenho de tráfego, surgiram várias técnicas que descreveremos sucintamente a seguir:

a) Alocação fixa de canais

Nessa técnica, cada sub-conjunto dos canais disponíveis para o sistema é alocado para uma célula, podendo ser reutilizado em outra, desde que se respeite a distância mínima de reutilização para que a interferência co-canal seja minimizada. Se todos os canais de uma célula estão ocupados, uma possível chamada que apareça em sua área de cobertura será bloqueada. Esta técnica funciona bem quando o perfil do tráfego é bem conhecido e estável. Entretanto, qualquer variação repentina pode causar distúrbios no sistema.

b) Alocação Dinâmica de Canais

Esse algoritmo contém algumas estratégias, onde se considera todos os canais do sistema disponíveis para todas as células. A alocação de canais é feita de acordo com a dinâmica da demanda dos usuários. Esta técnica tem um bom desempenho quando a distribuição de tráfego não é uniforme no tempo, mas piora muito quando temos alta carga de tráfego [1, 2].

c) Alocação Híbrida de Canais

Esta técnica é uma combinação das duas anteriores. Uma parte dos canais da célula é pré-alocada de forma fixa, e o resto dos canais é alocado de forma dinâmica de acordo com o comportamento do tráfego. O desempenho dessa técnica depende tanto da distribuição de tráfego, como da proporção de canais fixos em relação aos dinâmicos.

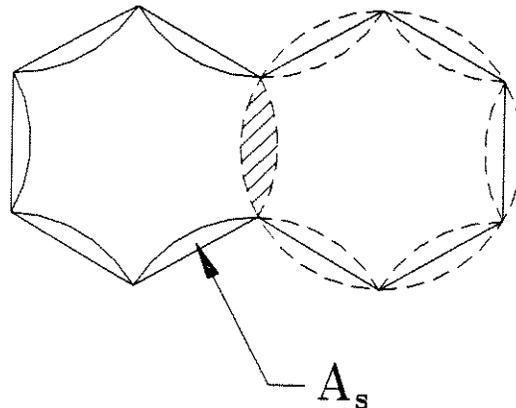
d) Alocação de Canais por Empréstimo

Nesta técnica, uma célula que tenha todos os seus canais ocupados procura um canal livre na célula vizinha. Se não existirem canais disponíveis, a chamada é bloqueada. É possível melhorar essa técnica "forçando" o empréstimo da célula adjacente mesmo quando ela está bloqueada. Ela irá, por sua vez, "forçar" o empréstimo de outra, e assim sucessivamente, até encontrar um canal disponível [3].

1.3. FUZZY CELL BOUNDARIES OU CÉLULAS CUJAS FRONTEIRAS SE SOBREPÕEM

A forma hexagonal das células em um sistema de telefonia móvel é um modelo ideal. Se considerarmos o uso de antenas omnidirecionais nas estações base, a área de cobertura de uma célula teria um formato que mais se aproximaria de um círculo. Conseqüentemente, existe uma intersecção natural dessas áreas servidas por estações base vizinhas, como

podemos ver na Figura 1.3.



A_s - área do hexágono onde há sobreposição da área de cobertura da estação base adjacente.

Figura 1.3 - Áreas de sobreposição comuns a duas estações base adjacentes.

Se um móvel está próximo da fronteira de uma célula, ele poderá ter uma comunicação adequada com mais de uma estação base. Podemos usar esse fato para encaminhar sua ligação para a célula menos sobrecarregada (com menos canais ocupados, por exemplo).

Daremos aqui apenas uma idéia aproximada da proporção do tráfego que pode ser considerada disponível para um encaminhamento alternativo. Cálculos mais rigorosos são encontrados na Referência [4].

Considerando a Figura 1.3, definimos γ como a proporção da área total do hexágono em que há sobreposição com as áreas de cobertura das seis estações base adjacentes.

$$\gamma = \frac{6A_s}{A_t}$$

onde:

A_t = área total do hexágono;

A_s = área de sobreposição de cada célula adjacente.

Calculando-se as áreas da Figura 1.3 vemos que γ é aproximadamente 21%. Se consideramos que os móveis estão uniformemente distribuídos dentro da célula, concluímos que 21% deles estão na "fuzzy area", ou seja, podem ser servidos por duas estações base.

Para que o "hand-off" possa ser feito com segurança, a área de cobertura da célula é expandida de forma que existirão áreas de sobreposição comuns às 3 estações base, como ilustra a Figura 1.4.

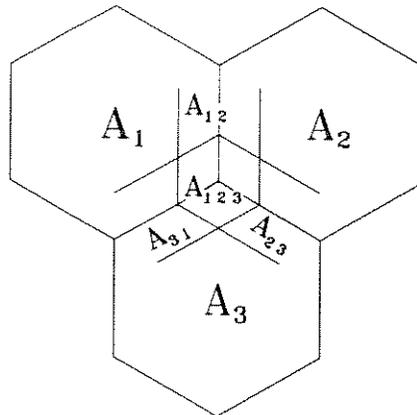


Figura 1.4 - Áreas de sobreposição comuns a três estações base adjacentes.

onde:

A_1, A_2, A_3 - tráfego fixo das células 1, 2 e 3, respectivamente;

A_{12}, A_{23}, A_{31} - tráfego flexível usando-se apenas dois caminhos (com acesso às células 1 e 2, 2 e 3, 3 e 1, respectivamente).

A_{123} - tráfego flexível com três caminhos (acesso às células 1, 2 e 3).

É conveniente analisar o sistema em termos do tráfego total A :

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_{12} + A_{23} + A_{31} + A_{123}$$

Definimos δ como a proporção da área de sobreposição que é comum às três células adjacentes. É óbvio que δ é uma função de γ (flexibilidade do sistema). Mais ainda, uma variação linear em γ implica uma variação quadrática de δ (porque houve uma variação de área).

Para os nossos propósitos, consideraremos $\delta = \gamma^2$. Na Referência [4] vemos que de fato δ é maior que γ^2 , ou seja, estamos subestimando δ ao fazer essa aproximação.

Consideremos, a título de exemplo, um sistema de 3 células com a seguinte

distribuição de tráfego: célula 1 com 0,75 erl; célula 2 com 4,25 erl; célula 3 com 2,5 erl.

Se γ é a proporção de móveis com 2 ou mais caminhos e δ é a proporção de móveis com 3 ou mais caminhos, então a proporção de móveis com apenas 2 caminhos é $\gamma - \delta$. Assumindo a aproximação $\delta = \gamma^2$ com $\gamma = 45\%$, então a distribuição dos tráfegos fixo e flexível é dada na Figura 1.5. Os tráfegos foram calculados como se segue:

- tráfego flexível entre células 1 e 2 = $(0,75 + 4,25) \cdot \left[\frac{\gamma - \delta}{2} \right]$
- tráfego flexível entre células 2 e 3 = $(4,25 + 2,5) \cdot \left[\frac{\gamma - \delta}{2} \right]$
- tráfego flexível entre células 3 e 1 = $(2,5 + 0,75) \cdot \left[\frac{\gamma - \delta}{2} \right]$
- tráfego flexível entre células 1, 2 e 3 = $(0,75 + 4,25 + 2,5) \cdot \delta$

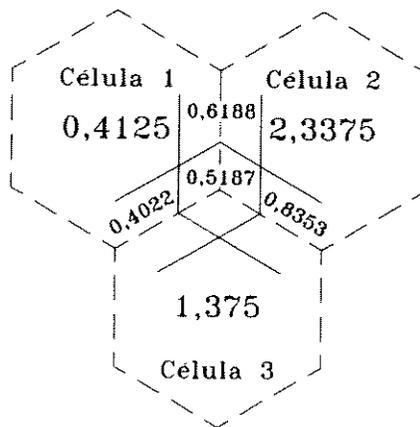


Figura 1.5 - Distribuição dos tráfegos fixo e flexível de um sistema de três células adjacentes.

Consideramos que o tráfego flexível disponível é dividido, metade para cada célula, no caso de termos 2 caminhos. Daí, o termo $\left[\frac{\gamma - \delta}{2} \right]$.

Se o tráfego total do sistema (7,5 erl) fosse convenientemente redistribuído (2,5 erl para cada célula) mediante a utilização do tráfego flexível, a probabilidade de bloqueio médio do sistema que era 16% (sem a utilização do tráfego flexível e considerando que cada

célula tenha 5 canais) cairia para 7%.

Concluindo esse item, citaremos 2 vantagens do encaminhamento alternativo através do tráfego flexível em relação às técnicas vistas no item 1.2:

- As técnicas citadas no item 1.2 (alocação dinâmica de canais, alocação híbrida e alocação por empréstimo) reclamam a utilização de uma unidade de controle de processamento central, onde cada chamada é tratada desde o início até o final. Já as técnicas que utilizam as áreas de sobreposição de 2 ou 3 células adjacentes para o encaminhamento alternativo podem ser tratadas de maneira descentralizada, dentro da MSC local.
- Estamos usando um recurso já disponível no sistema. Como dissemos antes, para que o "hand-off" seja efetuado, já existem essas áreas de sobreposição. É necessária uma certa flexibilidade do sistema para que as chamadas dos móveis que atravessam o limite entre duas células não sejam interrompidas, caso não haja disponibilidade imediata de canais na célula de ingresso.

1.4. CONCLUSÃO

Neste capítulo, conjecturamos sobre a existência de uma porcentagem considerável de estações móveis de uma célula possuindo comunicação adequada com duas estações rádio base e uma porcentagem menor de estações móveis possuindo uma comunicação ainda satisfatória com três estações rádio base.

Os algoritmos que serão apresentados nesse trabalho têm por objetivo direcionar o tráfego flexível (que existe em todo sistema de telefonia celular) para a célula, dentre todas com as quais a comunicação é adequada, a menos sobrecarregada.

CAPÍTULO 2

VARIAÇÃO DO LIMIAR DE BLOQUEIO PARA TRÊS CÉLULAS

Mencia [7], em seu trabalho, utilizou o algoritmo de Variação do Limiar de Bloqueio como técnica de encaminhamento de tráfego alternativo para um sistema de duas células contíguas.

Neste capítulo, estenderemos o trabalho de Mencia a um sistema de três células mutuamente adjacentes.

2.1. INTRODUÇÃO

Em 1991, Mencia [7] estudou o desempenho do tráfego de um sistema rádio móvel celular constituído de duas células contíguas, que utilizava a Variação do Limiar de Bloqueio como algoritmo de encaminhamento do tráfego flexível.

Esta técnica, detalhada a seguir no item 2.2, utiliza o tráfego da fronteira entre células, onde a estação móvel tem comunicação adequada com as duas estações base, para construir o algoritmo de encaminhamento alternativo. Em seu trabalho, Mencia [7] mostra que o ganho de tráfego com a utilização da técnica proposta é, de fato, substancial. Por outro lado, Yacoub [8] demonstra que uma considerável proporção de assinantes com acesso a duas células também pode se comunicar adequadamente com uma terceira célula.

É, portanto, plausível estender o estudo de Mencia para um sistema de três células mutuamente adjacentes, onde se tratam tanto o tráfego flexível com dois caminhos de rádio (com acesso a apenas duas células) quanto o tráfego flexível com três caminhos de rádio

(com acesso a três células).

No trabalho computacional desta tese consideramos duas opções para o tráfego flexível: 1) tráfego flexível com apenas dois caminhos e 2) tráfego flexível com dois e três caminhos. Poderemos verificar se a melhora do desempenho do sistema com a introdução do terceiro caminho compensa a complexidade de implementação a ela associada.

2.2. VARIACÃO DO LIMIAR DE BLOQUEIO PARA DUAS CÉLULAS

Apresentamos nesse item um resumo do trabalho de Mencia [7].

Seja o sistema de telefonia celular apresentado na Figura 2.1, composto por duas células contíguas. Supõe-se que em ambas as células os assinantes estejam uniformemente distribuídos.

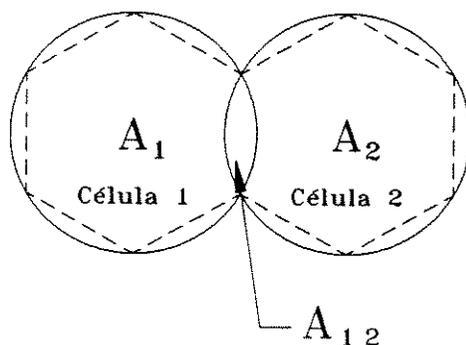


Figura 2.1 - Área de sobreposição comum a duas estações base adjacentes.

A técnica de alocação de canais proposta consiste em conduzir as chamadas dos assinantes que se encontram na fronteira entre as duas células, tendo acesso então às duas estações base, para a célula que esteja menos sobrecarregada.

Nesse sistema, temos três tipos de fluxo de tráfego:

- Tráfego fixo da célula 1 (A_1)
- Tráfego fixo da célula 2 (A_2)
- Tráfego flexível, com acesso às células 1 e 2 (A_{12}).

O tráfego fixo é aquele gerado pelas estações móveis que têm boa comunicação unicamente com a estação base da célula na qual se encontram no momento do início de uma chamada.

O tráfego flexível é aquele gerado pelas estações móveis que têm boa comunicação com ambas as estações base.

Podemos classificar as células com as quais o assinante com tráfego flexível pode se comunicar em duas categorias:

- **Célula de primeira opção** : é a célula onde o assinante está localizado, com a qual a comunicação é melhor.
- **Célula de segunda opção** : é a célula alternativa, com a qual a comunicação pode não ser tão boa, mas é ainda satisfatória.

Descreveremos em seguida a técnica de alocação de canais, onde a célula de segunda opção é tentada antes mesmo de a célula de primeira opção estar bloqueada (com todos os canais ocupados). O objetivo é tentar evitar o bloqueio, utilizando-se os recursos disponíveis (no caso, os canais da célula de segunda opção).

Consideremos que cada célula do sistema tenha a capacidade de N canais. Define-se L ($L \geq 0$) como o limiar de bloqueio com que cada célula irá operar. Por conveniência [7], adotou-se o mesmo limiar para todas as células. O limiar de bloqueio L indica o ponto a partir do qual a célula de primeira opção com L canais ocupados será preterida, cedendo lugar à célula de segunda opção que deverá ser tentada para escoar o tráfego flexível. A célula de segunda opção será escolhida se apresentar um número de canais ocupados inferior àquele da célula de primeira opção. Caso contrário, a chamada deverá permanecer na célula de origem.

Assim, para $L \geq N+1$ o sistema opera sem célula de segunda opção, ou seja, o tráfego flexível não é utilizado para técnicas de encaminhamento alternativo. Neste caso, o bloqueio médio pode ser calculado diretamente pela fórmula Erlang-B, pois as células estão mutuamente isoladas.

No caso em que $L = N$, a célula de segunda opção só é tentada quando a célula de primeira opção tiver todos os seus canais ocupados. Nestas condições, esta técnica coincide com a Directed Retry [9].

Variando-se L de $N + 1$ até zero, pode-se verificar o desempenho do sistema de acordo com os vários parâmetros envolvidos (tráfego total, desbalanceamento de tráfego

das células, proporção do tráfego flexível do sistema). Em particular, para $L = 0$, o algoritmo consiste em enviar o tráfego flexível para a célula com menor número de canais ocupados.

Até esse momento, supõe-se que, ao se transferir uma chamada para a célula de segunda opção, esta estaria com menos canais ocupados que a célula de primeira opção pois, se fosse o contrário, a chamada teria permanecido na célula de origem.

Seja agora o caso em que se tem tráfego flexível disponível e que ambas as células apresentam o mesmo número de canais ocupados, número esse igual ou maior que L .

São então propostas três estratégias:

- **Estratégia 1** - Enviar o tráfego flexível para a célula menos sobrecarregada para compensar o desbalanceamento de tráfego, caso exista.
- **Estratégia 2** - Repartir o tráfego flexível igualmente entre as células.
- **Estratégia 3** - Manter o tráfego flexível na célula de primeira opção.

As conclusões deste trabalho [7] foram:

- 1) Quanto maior a proporção de tráfego flexível do sistema, maior a eficácia da técnica de variação do limiar de bloqueio. Estudos rigorosos [8] mostram que 40% ou mais do tráfego total de uma célula pode ser considerado como disponível para encaminhamento alternativo.
- 2) Verificou-se um aumento substancial da capacidade de tráfego do sistema com a aplicação da técnica de encaminhamento alternativo proposta. No que se refere ao limiar de bloqueio, como era de se esperar, o melhor desempenho do sistema ocorre quando $L = 0$ mas o maior ganho de desempenho ocorre quando se passa de $L = N + 1$ para $L = N$; o segundo maior ganho quando se passa de $L = N$ para $L = N - 1$, e assim sucessivamente, até $L = 0$.
- 3) As estratégias 1, 2 e 3 apresentam um desempenho muito análogo, o que sugere que quando ambas as células apresentam um mesmo número de canais ocupados e este número é maior ou igual ao limiar de bloqueio, então a chamada pode ser aleatoriamente encaminhada para qualquer uma das duas células.

2.3. VARIAÇÃO DO LIMIAR DE BLOQUEIO PARA TRÊS CÉLULAS

Seja o sistema de telefonia celular apresentado na Figura 2.2, composto por três células adjacentes entre si. Supõe-se que em cada uma das três células os assinantes estejam uniformemente distribuídos.

A técnica de alocação de canais proposta consiste em conduzir os assinantes que se encontram nas fronteiras entre as células, e que têm acesso a mais de uma estação base, para a célula menos sobrecarregada. Pela Figura 2.2 nota-se que há regiões onde os assinantes têm acesso a apenas uma estação base (tráfegos A_1 , A_2 , A_3), regiões onde os assinantes têm acesso a duas estações base (tráfego flexível com dois caminhos A_{12} , A_{23} , A_{31}) e há uma região onde os assinantes têm acesso às três estações base (tráfego flexível com três caminhos A_{123}).

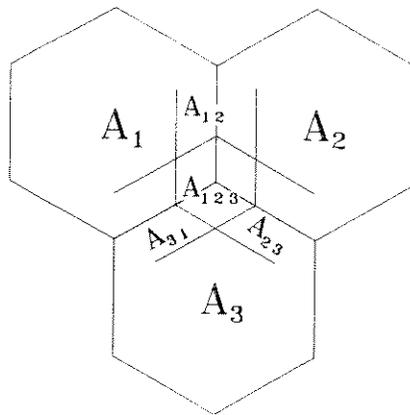


Figura 2.2 - Área de sobreposição comum a três estações base adjacentes.

As células com as quais o assinante com tráfego flexível pode se comunicar são classificadas em:

- **Célula de primeira opção** : é a própria célula do assinante, com a qual a comunicação é melhor (tráfegos A_1 , A_2 , A_3).
- **Célula de segunda opção** : excluindo-se a célula de primeira opção, é a célula com a qual a comunicação é melhor (tráfego A_{12} , A_{23} , A_{31}).
- **Célula de terceira opção** : excluindo-se as células de primeira e de segunda opção, é a célula com a qual a comunicação pode não ser tão boa, mas é ainda considerada como adequada (tráfego A_{123}).

Analogamente ao trabalho de Mencia [7], a técnica de encaminhamento do tráfego flexível propõe que as células de segunda e terceira opção sejam tentadas antes mesmo que a de primeira opção esteja bloqueada (com todos os canais ocupados). Desta forma, os móveis que não têm possibilidade de se comunicar com as estações base adjacentes encontrarão um sistema mais balanceado, onde uma célula só estará com todos seus canais tomados quando suas células adjacentes também estiverem.

Consideremos cada célula do sistema em questão com capacidade de N canais. Defina-se L ($L \geq 0$) como o limiar de bloqueio com que cada célula irá operar. Por conveniência, adotaremos o mesmo limiar para todas as células. O limiar de bloqueio L indica o ponto a partir do qual a célula de primeira opção com L canais ocupados será evitada, cedendo lugar às células de segunda ou terceira opção, que deverão ser tentadas. Se elas tiverem um número de canais ocupados superior ao limiar de bloqueio estabelecido, a chamada deverá permanecer na célula de origem. Caso contrário, será escolhida para escoar este tráfego a célula de segunda ou terceira opção que tiver menor número de canais ocupados.

Assim, para $L \geq N+1$ o sistema opera só com a célula de primeira opção, não utilizando o tráfego flexível para técnicas de encaminhamento alternativo. Neste caso, como as células estão isoladas umas das outras, o bloqueio médio pode ser calculado diretamente pela fórmula Erlang-B.

No caso em que $L = N$ as células de segunda ou terceira opção só serão tentadas quando a célula de primeira opção tiver todos os seus canais ocupados.

Nesta tese estudaremos a variação do bloqueio médio em função de diversos parâmetros: tráfego total, tráfego flexível com dois ou três caminhos, desbalanceamento das células, número de canais por célula, limiar de bloqueio. Como temos um grande leque de variáveis, manteremos umas constantes, enquanto variaremos outras. Desenvolveremos uma fórmula para o desbalanceamento global do sistema para o caso particular onde não há flexibilidade. Estenderemos o conceito de desbalanceamento global para o caso onde existe flexibilidade, com o objetivo de reduzir a complexidade da análise dos resultados. Analisaremos graficamente o comportamento dessa nova variável para o caso de termos flexibilidade do sistema, o que será apresentado no Capítulo 3.

No que se refere ao limiar de bloqueio, podemos nos colocar a seguinte questão: será melhor adotá-lo como zero (levar sempre em consideração o tráfego flexível) ou existe um valor conveniente, abaixo do qual o bloqueio médio pouco varia? No que se refere ao terceiro caminho de rádio, a questão que surge é a seguinte: será que o ganho de tráfego compensa a complexidade da implementação da estratégia considerando também esta opção? No Capítulo 5 comentaremos detidamente os resultados computacionais obtidos.

Na técnica da Variação do Limiar de Bloqueio para três células, o limiar de bloqueio

L indica o ponto a partir do qual a célula de primeira opção com L canais ocupados será preterida, cedendo lugar às células de segunda ou de terceira opção, que serão tentadas para escoar o tráfego flexível. A célula alternativa que apresentar o menor número de canais ocupados deverá escoar o tráfego flexível. No caso de três células, duas condições devem ser analisadas, relativas ao tráfego flexível:

- Tráfego com apenas dois caminhos de rádio:

Neste caso o tráfego alternativo será escoado pela célula com menor número de canais ocupados, podendo ser a célula de primeira ou de segunda opção.

- Tráfego com três caminhos de rádio:

Neste caso o tráfego alternativo será escoado pela célula com menor número de canais ocupados, podendo ser a célula de primeira, de segunda ou de terceira opção.

Definimos desbalanceamento de tráfego de uma célula como o desvio de seu fluxo de tráfego em relação ao fluxo médio do tráfego do sistema.

No caso em que as células envolvidas com o escoamento do tráfego flexível (células de primeira e de segunda opção ou células de primeira, de segunda e de terceira opção) apresentarem o mesmo número de canais ocupados, propõe-se três estratégias:

- **Estratégia 1** - Consiste em enviar o tráfego flexível (com dois ou três caminhos) para a célula menos desbalanceada.
- **Estratégia 2** - Não leva em consideração o desbalanceamento das células, repartindo o tráfego flexível igualmente entre as células em questão.
- **Estratégia 3** - O tráfego flexível permanece na célula de primeira opção, mantendo o desbalanceamento do sistema.

Note-se que essas estratégias diferirão uma da outra apenas no caso em que o sistema estiver desbalanceado. Caso contrário, em média, haverá coincidência entre elas e o desempenho do sistema será o mesmo, independentemente de qual estratégia estiver em uso.

A seguir detalham-se, através de exemplos, as situações mais relevantes na aplicação do algoritmo de encaminhamento do tráfego flexível em estudo. Por ser o mais geral, será considerado o caso em que o tráfego flexível com três caminhos de rádio está presente. Na prática, a questão de se considerar apenas dois ou então dois e três caminhos é sistêmica e será decidida pelo software de controle da central de comutação. Se apenas dois caminhos

forem considerados, então o tráfego flexível com três caminhos será repartido proporcionalmente no de dois caminhos e a decisão de encaminhamento será, obviamente, apenas para o tráfego de dois caminhos.

Sejam três células 1, 2 e 3, com respectivamente N_1 , N_2 e N_3 canais ocupados e L o limiar de bloqueio, que é o mesmo para as três células.

Sejam A_{12} , A_{23} e A_{31} os tráfegos flexíveis com dois caminhos e A_{123} o tráfego flexível com três caminhos.

2.3.1. Situação 1 : $N_1 \geq L$; $N_2 \geq L$; $N_3 \geq L$ e $N_1 > N_2 > N_3$

Será escolhida para fluir o tráfego flexível a célula que apresentar menor número de canais ocupados. Então,

- a célula 1 carrega só o seu tráfego fixo;
- a célula 2 carrega o seu tráfego fixo e o tráfego flexível A_{12} ;
- a célula 3 carrega o seu tráfego fixo, os tráfegos flexíveis com dois caminhos A_{31} e A_{23} e o tráfego flexível com três caminhos A_{123} .

2.3.2. Situação 2 : $N_1 = N_2 = N_3 \geq L$

Suponhamos que a célula 1 seja a mais desbalanceada do sistema e a 3 a menos desbalanceada.

As três estratégias seriam:

- **Estratégia 1** - consiste em enviar o tráfego flexível (com dois ou três caminhos) para a célula menos desbalanceada. Então,
 - a célula 1 carrega só o seu tráfego fixo;
 - a célula 2 carrega o seu tráfego fixo e tráfego flexível A_{12} ,
 - a célula 3 carrega o seu tráfego fixo e os tráfegos flexíveis A_{31} , A_{23} e A_{123} .

- **Estratégia 2** - não leva em consideração o desbalanceamento das células, repartindo o tráfego flexível igualmente entre as células em questão. Então as células 1, 2 e 3 levariam cada uma o seu próprio tráfego fixo e o seu próprio tráfego flexível.
- **Estratégia 3** - o tráfego flexível permanece na célula de primeira opção, mantendo o desbalanceamento do sistema. Então,
 - a célula 1 carrega o seu tráfego fixo e os tráfegos flexíveis A_{12} , A_{31} e A_{123} ;
 - a célula 2 carrega o seu tráfego fixo e o tráfego flexível A_{23} ;
 - a célula 3 carrega apenas o seu tráfego fixo.

2.3.3. Situação 3 : $N_1, N_2, N_3 \geq L$ e $N_1 > N_2 = N_3$

As três estratégias seriam:

- **Estratégia 1**
 - a célula 1 carrega apenas o seu tráfego fixo;
 - a célula 2 carrega o seu tráfego fixo e o tráfego flexível com dois caminhos A_{12} ;
 - a célula 3 carrega o seu tráfego fixo e o tráfego flexível com dois caminhos A_{31} .

Compara-se o desbalanceamento entre as células 2 e 3 e escolhe-se a que apresentar menor desbalanceamento para fluir os tráfegos A_{23} e A_{123} .

- **Estratégia 2**
 - a célula 1 carrega apenas o seu tráfego fixo;
 - a célula 2 carrega o seu tráfego fixo e o flexível A_{12} ;
 - a célula 3 carrega o seu tráfego fixo e o flexível A_{31} .

Os tráfegos flexíveis A_{23} e A_{123} são distribuídos igualmente entre as células 2 e 3.

- **Estratégia 3**
 - a célula 1 carrega apenas o seu tráfego fixo;

- a célula 2 carrega o seu tráfego fixo e o flexível A_{12} ;
- a célula 3 carrega o seu tráfego fixo e o flexível A_{31} .

Os tráfegos flexíveis A_{23} e A_{123} são escoados, dentre as células 2 e 3, pela que apresentar maior desbalanceamento.

2.3.4. Situação 4 : $N_1, N_2, N_3 \geq L$ e $N_1 = N_2 > N_3$

As três estratégias seriam:

- **Estratégia 1**

- a célula 1 carrega o seu tráfego fixo;
- a célula 2 carrega o seu tráfego fixo;
- a célula 3 carrega o seu tráfego fixo e os flexíveis A_{31} , A_{23} e A_{123} .

Comparam-se os desbalanceamentos das células 1 e 2 e escolhe-se a que apresentar menor desbalanceamento para fluir o tráfego A_{12} .

- **Estratégia 2**

- a célula 1 carrega o seu tráfego fixo;
- a célula 2 carrega o seu tráfego fixo;
- a célula 3 carrega o seu tráfego fixo e os flexíveis A_{31} , A_{23} e A_{123} .

O tráfego A_{12} é igualmente dividido entre as células 1 e 2.

- **Estratégia 3**

- a célula 1 carrega o seu tráfego fixo;
- a célula 2 carrega o seu tráfego fixo;
- a célula 3 carrega o seu tráfego fixo e os flexíveis A_{31} , A_{23} e A_{123} .

O tráfego A_{12} é escoado, dentre as células 1 e 2, pela que apresentar maior desbalanceamento.

2.3.5. Situação 5 : $N_1 \geq L$, $N_2 < L$, $N_3 < L$ e $N_2 > N_3$

As três estratégias são coincidentes:

- a célula 1 carrega o seu tráfego fixo;
- a célula 2 carrega o seu tráfego fixo e flexível e a parte da célula 1 do tráfego flexível A_{12} ;
- a célula 3 carrega o seu tráfego fixo e flexível e a parte da célula 1 do tráfego flexível A_{123} e a parte da célula 1 do tráfego flexível A_{31} .

Não existe tráfego flexível A_{23} .

2.3.6. Situação 6 : $N_1 \geq L$, $N_2 = N_3 < L$

As três estratégias seriam:

• Estratégia 1

- a célula 1 carrega o seu tráfego fixo;
- a célula 2 carrega o seu tráfego fixo e flexível e a parte da célula 1 do tráfego flexível A_{12} ;
- a célula 3 carrega o seu tráfego fixo e flexível e a parte da célula 1 do tráfego flexível A_{31} .

Será escolhida, dentre as células 2 e 3, a que tiver menor desbalanceamento para escoar a parte da célula 1 do tráfego flexível A_{123} .

Não existe tráfego flexível A_{23} .

• Estratégia 2

- a célula 1 carrega o seu tráfego fixo;
- a célula 2 carrega o seu tráfego fixo e flexível e a parte da célula 1 do tráfego flexível A_{12} ;
- a célula 3 carrega o seu tráfego fixo e flexível e a parte da célula 1 do tráfego flexível A_{31} .

A parte da célula 1 do tráfego flexível A_{123} será dividida igualmente entre as células 2 e 3.

Não existe tráfego flexível A_{23} .

- **Estratégia 3**

- a célula 1 carrega o seu tráfego fixo;
- a célula 2 carrega o seu tráfego fixo e flexível e a parte da célula 1 do tráfego flexível A_{12} ;
- a célula 3 carrega o seu tráfego fixo e flexível e a parte da célula 1 do tráfego flexível A_{31} .

Será escolhida, dentre as células 2 e 3, a que tiver maior desbalanceamento para escoar a parte da célula 1 do tráfego flexível A_{123} .

Não existe tráfego flexível A_{23} .

2.3.7. Situação 7 : $N_1, N_2 \geq L, N_3 < L$ e $N_1 > N_2$

As três estratégias são coincidentes:

- a célula 1 carrega o seu tráfego fixo;
- a célula 2 carrega o seu tráfego fixo e o tráfego flexível A_{12} ;
- a célula 3 carrega o seu tráfego fixo e os tráfegos flexíveis A_{31} , A_{123} e A_{23} .

2.3.8. Situação 8 : $N_1 = N_2 \geq L, N_3 < L$

As três estratégias seriam:

- **Estratégia 1**

- a célula 1 carrega o seu tráfego fixo;
- a célula 2 carrega o seu tráfego fixo;

- a célula 3 carrega o seu tráfego fixo e os tráfegos flexíveis A_{31} , A_{23} e A_{123} .

Será escolhida, dentre as células 1 e 2, a que tiver menor desbalanceamento para escoar o tráfego flexível A_{12} .

- **Estratégia 2**

- a célula 1 carrega o seu tráfego fixo;
- a célula 2 carrega o seu tráfego fixo;
- a célula 3 carrega o seu tráfego fixo e os tráfegos flexíveis A_{31} , A_{23} e A_{123} .

O tráfego flexível A_{12} é dividido igualmente entre as células 1 e 2.

- **Estratégia 3**

- a célula 1 carrega o seu tráfego fixo;
- a célula 2 carrega o seu tráfego fixo;
- a célula 3 carrega o seu tráfego fixo e os tráfegos flexíveis A_{31} , A_{23} e A_{123} .

Será escolhida, dentre as células 1 e 2, a que tiver maior desbalanceamento para escoar o tráfego flexível A_{12} .

2.3.9. Situação 9 : $N_1, N_2, N_3 < L$

A técnica da Variação do Limiar de Bloqueio não é aplicada e então cada uma das células 1, 2 e 3 carregará o seu próprio tráfego fixo e o seu próprio tráfego flexível.

- As conseqüências e implicações das três estratégias são as seguintes:

- a) Na estratégia 1 pretende-se compensar o desbalanceamento do sistema, enviando o tráfego flexível para as células menos desbalanceadas. Como essa estratégia atua em sentido contrário à tendência do tráfego, é de se esperar que seja a de melhor desempenho. Ressaltamos que só tem sentido fazer a diferenciação entre as estratégias nos casos em que duas ou três células apresentam o mesmo número de canais ocupados.

- b) Na estratégia 2 o tráfego flexível é dividido entre as células em questão. Em termos práticos, isto consiste em fazer um rodízio, ora mandando o tráfego flexível para uma célula, ora para a outra. Como essa estratégia é transparente em relação à tendência do tráfego, é de se esperar que o seu desempenho seja pior que o da estratégia 1.
- c) Na estratégia 3 pretende-se deixar a chamada flexível na célula de primeira opção. Como essa estratégia acentua a tendência do tráfego, é de se esperar que tenha o pior desempenho entre as três apresentadas.

2.4. CONCLUSÃO

Apresentamos de maneira sucinta a técnica da variação do limiar de bloqueio para um sistema de duas células, que foi estudado por Mencia [7], e que serviu de base para o sistema de três células, que é o objeto dessa tese.

Em seguida, discorremos com vagar a técnica da variação do limiar de bloqueio, aplicada ao sistema de três células e apresentamos as variantes do algoritmo proposto, que chamamos de estratégias.

CAPÍTULO 3

MODELO DE TRÁFEGO PARA O SISTEMA DE TRÊS CÉLULAS

Este capítulo tem por objetivo definir os parâmetros de tráfego de um sistema de três células, onde se admite uma dependência mútua do processo de tráfego entre células. Os parâmetros de entrada relacionam-se com as várias medidas de tráfego do sistema enquanto que os de saída dizem respeito às medidas de desempenho para a análise da técnica Variação do Limiar de Bloqueio aplicada a um sistema de três células.

3.1. INTRODUÇÃO

Considere um sistema de telefonia móvel constituído por três células mutuamente adjacentes, havendo sobreposição de suas áreas de cobertura, conforme a Figura 3.1. O tráfego gerado nas áreas de sobreposição das células pode ser utilizado como tráfego alternativo (com dois ou com três caminhos) para melhorar a taxa de ocupação dos canais e, conseqüentemente, o desempenho do sistema.

Definem-se como parâmetros de entrada do sistema:

- número de canais N : constituindo o número de canais de que cada célula dispõe. Por conveniência, adotamos o mesmo número de canais para todas as células;
- limiar de bloqueio L : constituindo o limiar de bloqueio com o qual cada célula deverá operar. Por conveniência, adotamos o mesmo limiar para todas as células;
- tráfego A : constituindo o tráfego total do sistema;

- flexibilidade γ : indicando a proporção de tráfego flexível com dois ou mais caminhos disponível no sistema;
- desbalanceamento β_i : constituindo o desbalanceamento médio de tráfego da célula i ($i = 1, 2, 3$);
- opção O : indicando se o sistema operará com a opção do tráfego flexível dispor de apenas dois ou então dois e três caminhos de rádio. Desta forma, será possível analisar qual a melhora do desempenho do sistema com a introdução do terceiro caminho.

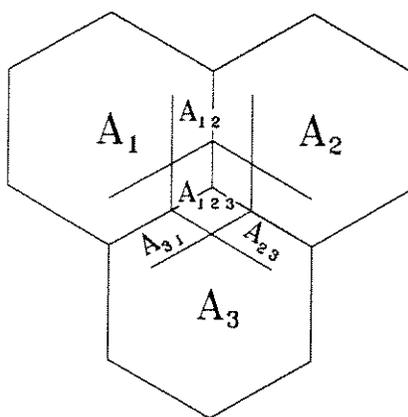


Figura 3.1 - Área de sobreposição comum a três estações base adjacentes.

O desempenho do sistema será analisado através das probabilidades de bloqueio experimentadas nas várias regiões da área de serviço. Em particular, torna-se interessante a avaliação global do sistema através da estimativa do bloqueio médio em função dos diversos parâmetros de entrada. As probabilidades de bloqueio, por sua vez, constituirão os parâmetros de saída.

As seções que se seguem detalham melhor cada um dos parâmetros.

3.2. FLUXOS DE TRÁFEGO

Na Figura 3.1 tem-se:

- A_1 , A_2 , A_3 como os tráfegos fixos com acesso apenas às células 1, 2, 3, respectivamente;

- A_{12} , A_{23} , A_{31} como os tráfegos flexíveis com acesso apenas às células 1 e 2, 2 e 3, 3 e 1, respectivamente;
- A_{123} como o tráfego flexível com acesso às células 1, 2 e 3. Se considerarmos que o tráfego flexível só possui dois caminhos, esse termo é nulo e deverá estar contido nos fluxos de tráfego com dois caminhos apenas. Note que, como mencionado anteriormente, esta é uma decisão sistêmica e que deverá ser avaliada adequadamente.

O tráfego fixo A_i é aquele gerado pelas estações móveis localizadas na célula i no momento do início da chamada, cuja comunicação só é adequada com a própria estação base servindo a célula correspondente.

O tráfego flexível A_{ij} é o tráfego gerado pelas estações móveis situadas na célula i ou na célula j que têm boa comunicação com a estação base da célula i e com a da célula j . Esse tráfego flexível só tem acesso a duas células.

O tráfego flexível A_{ijk} é o tráfego gerado pelas estações móveis situadas na célula i ou na célula j ou na célula k que têm boa comunicação com a estação base da célula i , com a da célula j e com a da k .

Sendo A o tráfego total do sistema, temos:

$$A = \sum_{i=1}^3 (A_i + A_{i,i\oplus 1} + \frac{1}{3}A_{i,i\oplus 1,i\oplus 2}) \quad (3.1)$$

onde \oplus denota soma módulo 3.

3.3. TRÁFEGO FLEXÍVEL

Definimos flexibilidade do sistema (γ) como a proporção do tráfego total que pode ser considerada como tráfego flexível (dois ou três caminhos). Então

$$\gamma = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^3 (A_{i,i\oplus 1} + \frac{1}{3}A_{i,i\oplus 1,i\oplus 2}) \quad (3.2)$$

Definimos flexibilidade parcial (δ) como a proporção do tráfego flexível do sistema com três ou mais caminhos no encaminhamento do tráfego. Assim:

$$\delta = \frac{A_{123}}{A} \quad (3.3)$$

Como sugerido no Capítulo 1, $\delta \approx \gamma^2$, o que, de fato, é uma subestimativa de δ [4].

Supõe-se que cada célula do sistema tenha uma distribuição uniforme de tráfego e que todas as células tenham igual proporção de sua área total que seja área de sobreposição. Nestas condições, pode-se afirmar que cada célula contribui para o tráfego flexível total do sistema com uma proporção γ do seu próprio tráfego total. Isto é, se A_i e Af_i são respectivamente os tráfegos fixo e flexível da célula i , então:

$$\gamma = \frac{Af_i}{A_i + Af_i}$$

ou

$$Af_i = \frac{\gamma}{1-\gamma} A_i \quad (3.4)$$

onde $i = 1, 2, 3$.

Manipulando-se as Equações (3.1) e (3.2) tem-se que:

$$\sum_{i=1}^3 A_i = (1-\gamma)A \quad (3.5)$$

Definimos $A2f_i$ e $A3f_i$, respectivamente, como o tráfego flexível com apenas dois caminhos e o tráfego flexível com três ou mais caminhos da célula i . Então

$$Af_i = A2f_i + A3f_i \quad (3.6)$$

Consideremos que a célula i contribuiu com uma proporção δ do seu tráfego total para o tráfego total do sistema que tem pelo menos três caminhos. Então

$$\delta = \frac{A3f_i}{A_i + Af_i} \quad (3.7)$$

Desta forma $(\gamma - \delta)$ é a proporção do tráfego total da célula i com apenas dois caminhos. Assim

$$\gamma - \delta = \frac{A2f_i}{A_i + Af_i} \quad (3.8)$$

Combinando-se as Equações (3.7) e (3.8) separadamente com a Equação (3.4), tem-se:

$$A2f_i = \frac{\gamma - \delta}{1 - \gamma} \cdot A_i \quad (3.9)$$

$$A3f_i = \frac{\delta}{1 - \gamma} \cdot A_i \quad (3.10)$$

3.4. DESBALANCEAMENTO DE TRÁFEGO

Considere o tráfego inflexível médio \bar{A} dado por:

$$\bar{A} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 A_i \quad (3.11)$$

Definimos o parâmetro desbalanceamento de tráfego da célula i como β_i , que indica o desvio do tráfego fixo da célula i em relação ao valor do tráfego médio \bar{A} . Desta forma:

$$\beta_i = \frac{A_i - \bar{A}}{\bar{A}}, \quad i = 1, 2, 3$$

ou

$$A_i = (1 + \beta_i) \bar{A} \quad (3.12)$$

Combinando-se as Equações (3.5) e (3.11) temos:

$$\bar{A} = \frac{1}{3}(1 - \gamma)A \quad (3.13)$$

Analisando a Equação (3.12) concluímos que o desbalanceamento das células pode variar na faixa:

$$-1 \leq \beta_i \leq 2 \quad (3.14)$$

sendo que:

$\beta_i = -1$ significa que não há tráfego na célula i ;

$\beta_i = 0$ significa que à célula i é oferecido o tráfego médio do sistema;

$\beta_i = 2$ significa que à célula i é oferecido todo o tráfego do sistema.

Combinando-se as Equações (3.11) e (3.12) tem-se que:

$$\sum_{i=1}^3 \beta_i = 0 \quad (3.15)$$

3.5. OS FLUXOS DE TRÁFEGO E OS PARÂMETROS DO SISTEMA

O desempenho do sistema será analisado em função dos seus parâmetros de entrada, quais sejam : tráfego total (A), flexibilidade (γ), desbalanceamentos individuais (β_i), número de canais (N), limiar de bloqueio (L), e opção de dois ou dois e três caminhos (O). Dados estes parâmetros calculam-se os diversos fluxos de tráfego do sistema. Estes fluxos são afetados diretamente pelos parâmetros A , γ , β_i e O , sendo que os demais, N e L , serão utilizados no modelo do processo de tráfego do sistema juntamente com os referidos fluxos.

Neste item os fluxos de tráfego A_1 , A_2 , A_3 , A_{12} , A_{23} , A_{31} e A_{123} serão colocados em função de A , γ , β_i e, implicitamente, de O .

Combinando-se as Equações (3.12) e (3.13) tem-se o seguinte para o tráfego fixo:

$$A_i = \frac{1}{3} A(1-\gamma)(1+\beta_i) \quad , \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.16)$$

Considerando que as estações móveis estejam uniformemente distribuídas nas

células, o tráfego flexível total de uma célula com apenas dois caminhos será igualmente dividido nas suas fronteiras com as duas células vizinhas. Então:

$$A_{i,i\oplus 1} = \frac{1}{2}[A2f_i + A2f_{i\oplus 1}] , \quad i = 1,2,3 \quad (3.17)$$

Substituindo-se as Equações (3.9) e (3.16) na Equação (3.17), temos:

$$A_{i,i\oplus 1} = \frac{1}{6}A(\gamma - \delta)(2 - \beta_{i\oplus 2}) , \quad i = 1,2,3 \quad (3.18)$$

Fazendo um raciocínio análogo para o tráfego flexível com três caminhos, tem-se:

$$A_{123} = \sum_{i=1}^3 A3f_i \quad (3.19)$$

Substituindo-se as Equações (3.10) e (3.16) na Equação (3.19), temos:

$$A_{123} = \delta A \quad (3.20)$$

Note que as equações deduzidas apareceram em função de A , γ , β_i e δ , apesar de δ não se constituir num parâmetro de entrada. No entanto, sabe-se que δ é uma função de γ , sendo que uma boa aproximação é dada por [4]:

$$\delta = \begin{cases} 1,25 \gamma^2 & 0 \leq \gamma \leq 0,8 \\ \gamma^2 & 0,8 \leq \gamma \leq 1 \end{cases} \quad (3.21)$$

Um caso particular do estudo do sistema de três células seria não considerar a possibilidade do tráfego flexível ter três caminhos de escoamento, mas apenas dois. Em outros termos, a estação móvel irá procurar por só mais uma estação base para se comunicar, além de sua própria. Nesse caso, δ será nulo, e, conseqüentemente, A_{123} . O parâmetro de entrada O define exatamente esta condição.

No nosso trabalho prático simulamos as duas possibilidades (tráfego flexível com

apenas dois caminhos e tráfego flexível com dois e três caminhos) para avaliarmos a melhora do desempenho do sistema com a introdução do terceiro caminho.

3.6. MEDIDA DE DESEMPENHO

Analisaremos o desempenho do sistema através da Probabilidade de Bloqueio Médio, B_m , tal que:

$$B_m = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^3 (A_i B_i + A_{i,i\oplus 1} B_{i,i\oplus 1} + \frac{1}{3} A_{i,i\oplus 1,i\oplus 2} B_{i,i\oplus 1,i\oplus 2}) \quad (3.22)$$

onde:

- B_i é a probabilidade da célula i estar bloqueada;
- $B_{i,i\oplus 1}$ é a probabilidade das células i e $i\oplus 1$ estarem bloqueadas simultaneamente;
- $B_{i,i\oplus 1,i\oplus 2}$ é a probabilidade das células i , $i\oplus 1$ e $i\oplus 2$ estarem bloqueadas simultaneamente.

Essas probabilidades de bloqueio serão calculadas utilizando-se como ferramenta os Processos de Markov, especificamente os Processos de Nascimento e Morte. Este estudo é tema do Capítulo 4.

3.7. DESBALANCEAMENTO GLOBAL DO SISTEMA

Estudaremos o desempenho do sistema em função dos vários parâmetros de entrada. É conveniente então reduzir o número de parâmetros em função dos quais o bloqueio médio será mostrado, de forma a visualizar mais facilmente as variações do desempenho do sistema quando se altera algum parâmetro de entrada. É óbvio que a perda de informação correspondente deverá ser mínima.

Neste item será proposto um novo parâmetro β , escrito em função dos desbalanceamentos individuais β_i , tal que reflita o desbalanceamento global do sistema.

Como será visto adiante, este parâmetro estará diretamente relacionado com a distribuição de tráfego do sistema.

Seja a Equação (3.16). Supondo que não haja flexibilidade ($\gamma = 0$), temos:

$$A_i = \frac{1}{3} A(1 + \beta_i) \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.23)$$

Se não há flexibilidade,

$$A_{i,i \oplus 1} = 0, \quad i = 1, 2, 3$$

e

$$A_{123} = 0.$$

Então a Equação (3.22) se resumiria a:

$$B_m = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^3 A_i B_i \quad (3.24)$$

Substituindo (3.23) em (3.24) tem-se:

$$B_m = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (1 + \beta_i) B_i \quad (3.25)$$

Se não há flexibilidade, $B_i = E(A_i, N)$, que é a fórmula de Erlang, válida quando as células estão separadas umas das outras.

Então:

$$B_m = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (1 + \beta_i) E(A_i, N) \quad (3.26)$$

Substituindo (3.23) em (3.26) temos:

$$B_m = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (1+\beta_i) E\left[\frac{A}{3}(1+\beta_i), N\right] \quad (3.27)$$

Suponha que para um $f(x)$ arbitrário, expandível como série de potências, exista $g(x, \beta)$ tal que:

$$g(x, \beta) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (1+\beta_i) f(x+\beta_i x) \quad (3.28)$$

Definimos

$$f(x) = \sum_k a_k x^k \quad (3.29)$$

e

$$g(x) = x^n f(x) = \sum_k a_k x^{k+n} \quad (3.30)$$

onde

$$k, n \geq 0$$

Então, diferenciando ambos lados da Equação (3.30) r vezes, temos:

$$g^{(r)}(x) = \sum_k a_k (k+n)^{(r)} x^{k+n-r} = r! \sum_k a_k \binom{k+n}{r} x^{k+n-r}$$

onde

$$(k+n)^{(r)} = (k+n)(k+n-1) \dots (k+n-r+1)$$

Então

$$\sum_k a_k \binom{k+n}{r} x^k = \frac{x^{r-n}}{r!} g^{(r)}(x)$$

Especificamente para $n = 1$, $g(x) = x f(x)$ e

$$\sum_k a_k \binom{k+1}{r} x^k = \frac{x^{r-1}}{r!} g^{(r)}(x) \quad (3.31)$$

Substituindo a Equação (3.29) na Equação (3.28) vem:

$$g(x, \beta) = \frac{1}{3} \sum_k a_k x^k \left(\sum_{j=1}^3 (1+\beta_j)^{k+1} \right) \quad (3.32)$$

onde

$$\sum_{j=1}^3 (1+\beta_j)^{k+1} = \sum_{i=0}^{k+1} \binom{k+1}{i} \sum_{j=1}^3 \beta_j^i$$

Assim

$$\begin{aligned} g(x, \beta) &= \frac{1}{3} \sum_k a_k x^k \left\{ \sum_{i=0}^{k+1} \binom{k+1}{i} \sum_{j=1}^3 \beta_j^i \right\} \\ &= \frac{1}{3} \left[\sum_{i=0}^{k+1} \beta_1^i \sum_k a_k x^k \binom{k+1}{i} + \sum_{i=0}^{k+1} \beta_2^i \sum_k a_k x^k \binom{k+1}{i} + \sum_{i=0}^{k+1} \beta_3^i \sum_k a_k x^k \binom{k+1}{i} \right] \quad (3.33) \end{aligned}$$

onde, pela Equação (3.31) sabemos que:

$$\sum_k a_k x^k \binom{k+1}{i} = \frac{x^{i-1}}{i!} g^{(i)}(x) \quad (3.34)$$

Suponha

$$f(x) = \frac{x^N}{N!} e^{-x} \cong E(x, N)$$

então

$$x \cdot f(x) = \frac{x^{N+1}}{N!} e^{-x}$$

onde

$$\frac{d}{dx}[x \cdot f(x)] = f(x) (N + 1 - x) \quad (3.35)$$

e

$$\frac{d^2}{dx^2}[x \cdot f(x)] = f(x) \left[(N + 1 - x) \left(\frac{N}{x} - 1 \right) - 1 \right] \quad (3.36)$$

Da Equação (3.33) fazendo-se $i = 0, 1, 2$, temos:

$$g(x, \beta) = \frac{1}{3} \left[3 \sum_k a_k x^k \binom{k+1}{0} + \sum_{i=1}^3 \beta_i \sum_k a_k \cdot x^k \binom{k+1}{1} + \sum_{i=1}^3 \beta_i^2 \sum_k a_k x^k \binom{k+1}{2} + O(x^3) \right] \quad (3.37)$$

onde, da Equação (3.34) e sabendo-se que $g(x) = xf(x)$, temos:

$$\sum_k a_k x^k \binom{k+1}{0} = x^{-1} x f(x) = f(x)$$

$$\sum_k a_k x^k \binom{k+1}{1} = g^{(1)}(x) = \frac{d}{dx}[x \cdot f(x)] = f(x) (N + 1 - x)$$

$$\begin{aligned} \sum_k a_k x^k \binom{k+1}{2} &= \frac{x}{2} g^{(2)}(x) = \frac{x}{2} \frac{d^2}{dx^2}[x f(x)] = \\ &= \frac{x}{2} f(x) \left[(N + 1 - x) \left(\frac{N}{x} - 1 \right) - 1 \right] \end{aligned}$$

Assim, a Equação (3.37) resulta em:

$$g(x, \beta) = \frac{1}{3} \left[3f(x) + \sum_{i=1}^3 \beta_i f(x)(N + 1 - x) + \sum_{i=1}^3 \beta_i^2 f(x) \cdot \frac{x}{2} \left[(N + 1 - x) \cdot \left(\frac{N}{x} - 1 \right) - 1 \right] \right]$$

$$g(x, \beta) = \frac{f(x)}{3} \left[3 + \sum_{i=1}^3 \beta_i (N+1-x) + \sum_{i=1}^3 \beta_i^2 \cdot \frac{x}{2} \left[(N+1-x) \cdot \left(\frac{N}{x} - 1 \right) - 1 \right] \right]$$

Como pela definição de desbalanceamento temos que

$$\sum_{i=1}^3 \beta_i = 0,$$

temos:

$$\begin{aligned} g(x, \beta) &= \frac{f(x)}{3} \left\{ 3 + \sum_{i=1}^3 \beta_i^2 \left[\frac{1}{2} N(N+1) - (N+1)x + \frac{1}{2} x^2 \right] \right\} = \\ f(x) &\left\{ 1 + \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 \beta_i^2 \left[\frac{1}{2} N(N+1) - (N+1)x + \frac{1}{2} x^2 \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.38)$$

Ou então

$$g(x, \beta) = f(x) [1 + \beta^2 K] \quad (3.39)$$

onde

$$\beta^2 = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^3 \beta_i^2 \quad (3.40)$$

e

$$K = N(N+1) - 2(N+1)x + x^2 \quad (3.41)$$

Da Equação (3.28), fazendo-se

$$x = \frac{A}{3},$$

temos:

$$\begin{aligned}
g(A, \beta) &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (1 + \beta_i) f\left(\frac{A}{3} + \beta_i \frac{A}{3}\right) \\
&= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (1 + \beta_i) f\left(\frac{A}{3} (1 + \beta_i)\right)
\end{aligned}$$

Como fizemos a aproximação

$$E(x, N) = \frac{x^N}{N!} e^{-x} = f(x),$$

temos:

$$\begin{aligned}
g(A, \beta) &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (1 + \beta_i) E\left[\frac{A}{3} (1 + \beta_i), N\right] \\
\therefore g(A, \beta) &= B_m(A, \beta)
\end{aligned}$$

Então, quando não há flexibilidade ($\gamma = 0$), das Equações (3.39), (3.40) e (3.41) temos:

$$B_m = E\left[\frac{A}{3}, N\right] \left[1 + \beta^2 K\right] \quad (3.42)$$

onde

$$\beta^2 = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^3 \beta_i^2 \quad (3.43)$$

e

$$K = N(N+1) - 2(N+1) \left(\frac{A}{3}\right) + \left(\frac{A}{3}\right)^2 \quad (3.44)$$

Para que K seja positivo, devemos ter a restrição:

$$\frac{A}{3} > N+1 + \sqrt{N+1} \quad \text{ou}$$

$$\frac{A}{3} < N+1 - \sqrt{N+1}$$

Contudo, ao desenvolver a (Eq. 3.37) fizemos uma aproximação, considerando-se tráfego pequeno ($O(x^3) \cong 0$).

Então, para que a (Eq. 3.42) seja válida, devemos ter:

$$\frac{A}{3} < N+1 - \sqrt{N+1} \quad (3.45)$$

Neste trabalho utilizamos $A = 6,33$ erl. e $N = 6$. Então

$$\frac{A}{3} = 2,11 \text{ erl} < N+1 - \sqrt{N+1} = 4,35$$

O parâmetro β , definido na Equação (3.43), expressa o desbalanceamento global do sistema. Ele é nulo ($\beta = 0$) se os desbalanceamentos individuais são nulos ($\beta_i = 0$, $i = 1, 2, 3$), indicando um sistema balanceado, ou será unitário ($\beta = 1$) se a condição $\beta_i = 2$ (portanto, $B_{i\oplus 1} = \beta_{i\oplus 2} = -1$), indicando que todo o tráfego é oferecido a uma única célula (no caso, a célula i).

Para valores intermediários de β ($0 < \beta < 1$), outras distribuições de tráfego são obtidas.

Note que β é uma variável que, embora reflita o desbalanceamento do sistema, não implica em um valor unívoco para β_1 , β_2 e β_3 .

A seguir, a título de exemplo, plotamos duas curvas na Figura 3.2, onde se considera o caso de um sistema de telefonia celular constituído por três células, cada célula com seis canais disponíveis. O tráfego total do sistema é 6,33 erl e considera-se o caso em que não há flexibilidade ($\gamma = 0$). Consideramos ainda um sistema desbalanceado, onde se varia a distribuição de tráfego, de forma a que se tenha o parâmetro β variando de 0 a 1. As curvas traçadas nos mostram o bloqueio médio em função do desbalanceamento global, β , do sistema.

A curva superior na Figura 3.2 é exata, calculada através da fórmula de Erlang. A curva inferior é a Equação (3.42), onde β e K são dados pelas Equações (3.43) e (3.44).

Concluimos, pela Figura 3.2, que a Equação (3.42) é uma aproximação razoável do valor exato e, portanto, a variável desbalanceamento global reflete de uma maneira conveniente o desbalanceamento do sistema. Note que a curva é suave, sem descontinuidades, sendo mais fiel para $\beta < 0,5$.

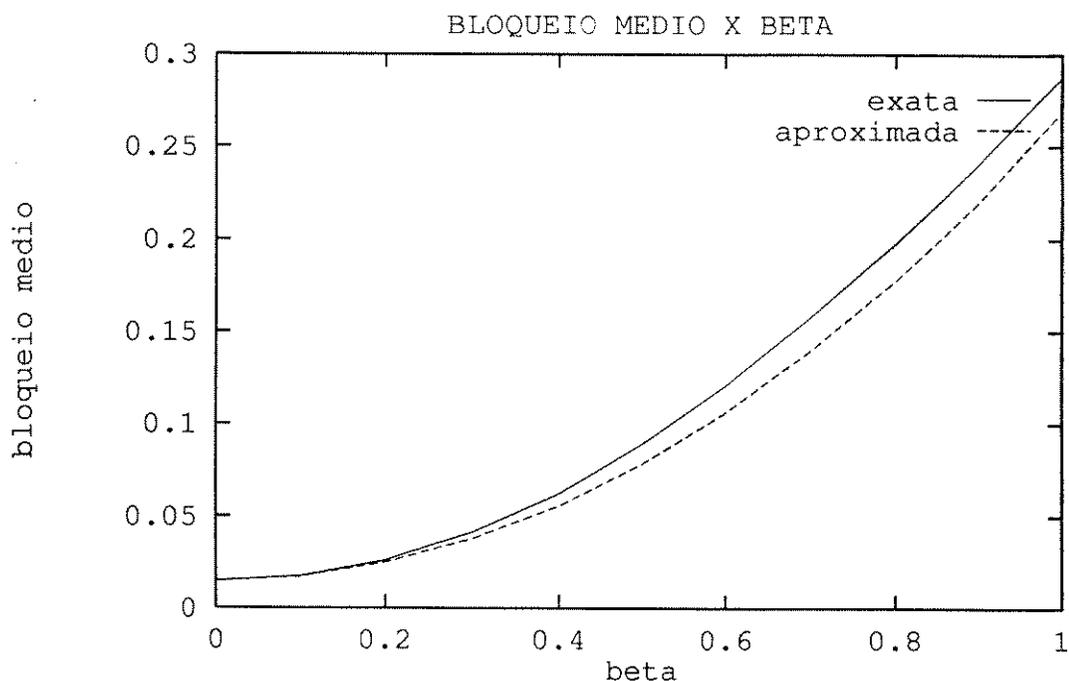


Figura 3.2 - Bloqueio médio versus desbalanceamento: valor exato e valor aproximado.

3.8. CONCLUSÕES

Neste Capítulo definimos os parâmetros de entrada do sistema, que são: número de canais N , limiar de bloqueio L , tráfego total A , flexibilidade do sistema γ , desbalanceamento de tráfego da célula i ($i = 1, 2, 3$) β_i e a opção O de se considerar tráfego flexível com dois caminhos ou tráfego flexível com dois e três caminhos. Definiram-se também os parâmetros de saída que serão utilizados para a avaliação de desempenho do sistema.

Calculamos os fluxos de tráfego em função dos parâmetros de entrada, tendo por objetivo o estudo do desempenho do sistema, que será feito através do cálculo do bloqueio médio. Para esse cálculo são necessários, além das expressões dos fluxos de tráfego, as várias probabilidades de bloqueio das células (probabilidade de bloqueio individual de cada célula ou conjunta, de duas ou três células), que serão o objetivo do Capítulo 4.

A partir da flexibilidade γ , calcula-se a flexibilidade parcial δ e a partir de β_i ($i = 1, 2, 3$) calcula-se o desbalanceamento global β . A introdução do parâmetro β tem por objetivo a redução do número de parâmetros do sistema, para que se possa visualizar melhor os resultados computacionais obtidos, relativamente às várias distribuições de tráfego do sistema.

Mostrou-se, através de cálculos computacionais apresentados na Figura 3.2, que a variável β reflete de maneira adequada o desbalanceamento do sistema.

CAPÍTULO 4

PROCESSO DE MARKOV PARA TRÊS CÉLULAS

O desempenho do sistema de telefonia celular, constituído por três células mutuamente adjacentes será analisado através da Probabilidade de Bloqueio Médio, B_m , dada pela Equação (4.1):

$$B_m = \frac{1}{A} \left[\sum_{i=1}^3 \left(A_i B_i + A_{i,i\oplus 1} B_{i,i\oplus 1} + \frac{1}{3} A_{i,i\oplus 1,i\oplus 2} B_{i,i\oplus 1,i\oplus 2} \right) \right] \quad (4.1)$$

onde:

\oplus denota soma módulo 3;

A_i é o tráfego fixo da célula i ;

$A_{i,i\oplus 1}$ é o tráfego flexível com acesso apenas às células i e $i\oplus 1$;

$A_{i,i\oplus 1,i\oplus 2}$ é o tráfego flexível com acesso às células i , $i\oplus 1$ e $i\oplus 2$;

B_i é a probabilidade da célula i estar bloqueada;

$B_{i,i\oplus 1}$ é a probabilidade das células i e $i\oplus 1$ estarem bloqueadas simultaneamente;

$B_{i,i\oplus 1,i\oplus 2}$ é a probabilidade das células i , $i\oplus 1$ e $i\oplus 2$ estarem bloqueadas simultaneamente.

Os três diferentes fluxos de tráfego especificados acima já foram explorados no Capítulo 3. Neste capítulo será mostrado um método para o cálculo das probabilidades de bloqueio experimentadas pelos diversos fluxos de tráfego. Em particular, será utilizada a Cadeia de Markov, através do Processo de Nascimento e Morte tridimensional aplicado a três células.

4.1. INTRODUÇÃO

O processo de tráfego de um sistema de telefonia celular pode ser modelado através dos Processos de Markov e, em particular, através dos Processos de Nascimento e Morte, que é uma ferramenta tradicional da teoria de tráfego.

Na análise do tráfego de um sistema rádio móvel considera-se que [10]:

- (i) as chamadas têm chegada poissoniana;
- (ii) os tempos de retenção têm distribuição exponencial negativa;
- (iii) as chamadas bloqueadas são perdidas.

4.2. PROCESSO DE NASCIMENTO E MORTE PARA UMA CÉLULA

Nos processos de nascimento e morte as transições de estados ocorrem somente entre estados vizinhos, isto é, se x_n é um estado qualquer no instante n tal que $x_n = i$, então $x_{n+1} = i - 1, i, \text{ ou } i + 1$ e nenhum outro valor. A transição de i para $i + 1$ corresponde a um nascimento, e a transição de i para $i - 1$ a uma morte. Usaremos a seguinte notação:

λ_n - é a taxa de nascimento, que descreve a taxa com a qual os nascimentos ocorrem numa determinada população de tamanho n .

μ_n - é a taxa de morte, que descreve a taxa com a qual as mortes ocorrem numa população de tamanho n .

Note-se que λ_n e μ_n são taxas e não probabilidades. Elas podem, contudo, ser convertidas em probabilidades se foram multiplicadas pelo tempo infinitesimal dt , passando a ser a probabilidade de que tal transição ocorra durante dt .

Um processo de nascimento e morte unidimensional pode ser representado pelo diagrama de transição de estados, como ilustrado na Figura 4.1.

Seja $p_k(t)$ a probabilidade de que o sistema esteja no estado S_k no instante de tempo t . Por simples inspeção da Figura 4.1, podemos escrever as seguintes relações:

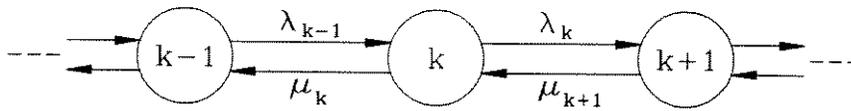


Figura 4.1 - Processo de nascimento e morte para uma célula.

$$\text{prob. de chegada ao estado } S_k = [\lambda_{k-1} p_{k-1}(t) + \mu_{k+1} p_{k+1}(t)]dt \quad (4.2)$$

$$\text{prob. de partida do estado } S_k = (\lambda_k + \mu_k)p_k(t)dt \quad (4.3)$$

A diferença entre as probabilidades acima é a probabilidade diferencial $dp_k(t)$, tal que

$$\frac{dp_k(t)}{dt} = \lambda_{k-1} p_{k-1}(t) + \mu_{k+1} p_{k+1}(t) - (\lambda_k + \mu_k)p_k(t) \quad (4.4)$$

À medida que t tende a infinito, o sistema tende a uma solução de equilíbrio, onde o comportamento transitório deixa de existir. Então, $dp_k(t)/dt$ tende a zero e passamos a escrever $p_k(t)$ como p_k .

Da Equação (4.4) temos então:

$$\lambda_{k-1} p_{k-1} + \mu_{k+1} p_{k+1} = (\lambda_k + \mu_k)p_k, \quad k \geq 0 \quad (4.5)$$

onde $p_{-1} = 0$, $\mu_0 = 0$ e $\lambda_{-1} = 0$.

A Equação (4.5) mostra que no equilíbrio, a taxa do fluxo que entra no estado S_k é igual à taxa do fluxo que sai do estado S_k .

Escrevendo-se a Equação (4.5) para $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ e observando-se que a soma das probabilidades p_k deve ser unitária, temos:

$$\lambda_{k-1} p_{k-1} + \mu_{k+1} p_{k+1} = (\lambda_k + \mu_k)p_k, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

onde $p_{-1} = 0$, $\mu_0 = 0$ e $\lambda_{-1} = 0$.

$$\sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1$$

Pode-se resolver o conjunto de equações e obter-se:

$$p_k = p_0 \prod_{i=0}^{k-1} \lambda_i / \mu_{i+1} \quad (4.6)$$

$$\text{onde } p_0 = \left[1 + \sum_{k=1}^{\infty} \prod_{i=0}^{k-1} \lambda_i / \mu_{i+1} \right]^{-1}$$

4.3. PROCESSO DE NASCIMENTO E MORTE PARA DUAS CÉLULAS

O processo de tráfego para duas células é modelado utilizando-se um processo bi-dimensional de nascimento e morte, conforme ilustra a Figura 4.2. O número do estado é um vetor de duas componentes (i, j), onde i e j são o número de canais ocupados nas células 2 e 1, respectivamente. Existem duas taxas de nascimento para cada estado (i, j), chamadas λ_{1ij} e λ_{2ij} , definidas pela taxa de chegada na célula 1 e 2, respectivamente. De forma análoga, há duas taxas de morte μ_{1ij} e μ_{2ij} definidas como a taxa de partida das células 1 e 2.

Da Figura 4.2 podemos extrair que um estado genérico (i, j) possui quatro estados vizinhos possíveis, como ilustra a Figura 4.3.

A equação de equilíbrio para o estado (i, j) pode ser escrita como:

$$-(\lambda_{1ij} + \mu_{1ij} + \lambda_{2ij} + \mu_{2ij})p_{ij} + \mu_{1ij+1} p_{ij+1} + \lambda_{1ij-1} p_{ij-1} + \mu_{2i+1j} p_{i+1j} + \lambda_{2i-1j} p_{i-1j} = 0 \quad (4.7)$$

onde p_{xy} é a probabilidade do estado de equilíbrio xy.

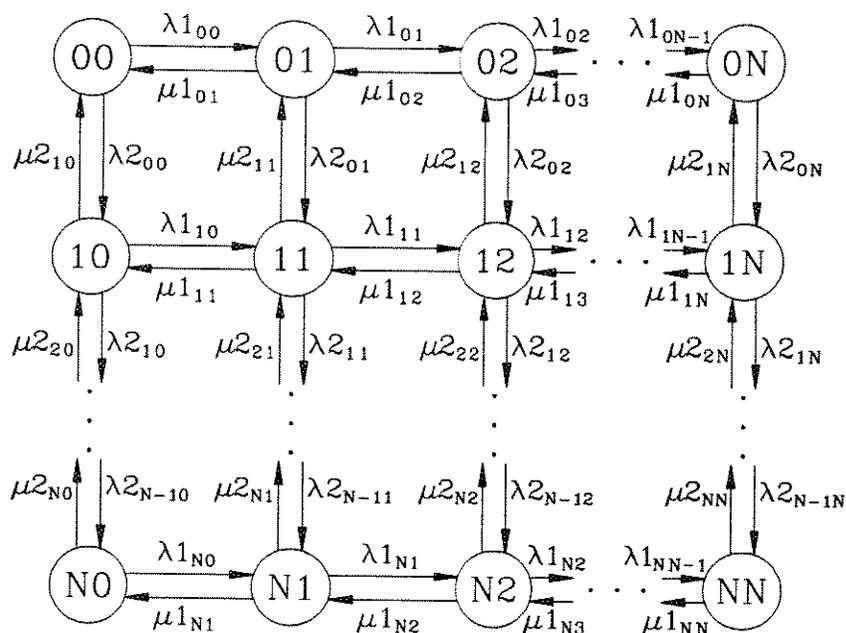


Figura 4.2 - Processo de nascimento e morte para duas células.

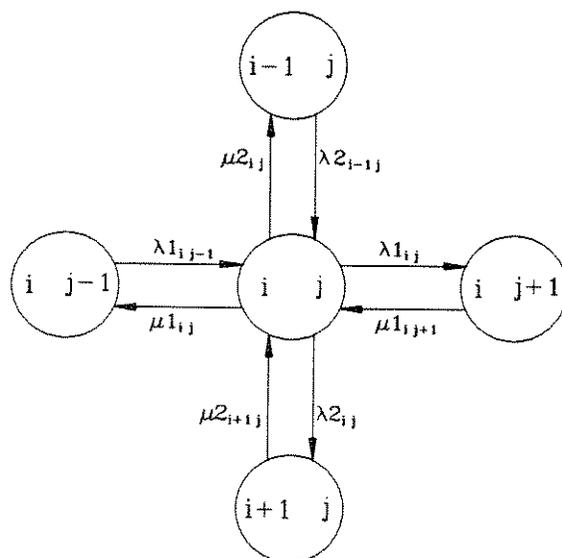


Figura 4.3 - Um estado genérico (i, j) e seus estados vizinhos.

Escrevendo-se a Equação (4.7) para todos os $(N + 1)^2$ estados, é obtido um sistema linear homogêneo de $(N + 1)^2$ equações. Como p_{xy} são distribuições de probabilidades, a Equação (4.8) pode ser usada para substituir qualquer uma das equações do equilíbrio para gerar a solução:

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N p_{ij} = 1 \quad (4.8)$$

Então, as probabilidades do estado de equilíbrio serão calculadas resolvendo-se um sistema de $(N + 1)^2$ equações.

4.4. PROCESSO DE NASCIMENTO E MORTE PARA TRÊS CÉLULAS

O processo de nascimento e morte para três células é modelado utilizando-se um diagrama de estado tridimensional onde o número do estado é um vetor de três componentes, cada componente denotando o número de canais ocupados em cada célula. Há três taxas de nascimento para cada estado (i, j, k) , chamadas λ_{1ijk} , λ_{2ijk} e λ_{3ijk} , definidas pela taxa de chegada na célula 1, célula 2 e célula 3, respectivamente. De forma análoga, há três taxas de morte para cada estado (i, j, k) , chamadas μ_{1ijk} , μ_{2ijk} e μ_{3ijk} , definidas pela taxa de saída das células 1, 2 e 3, respectivamente.

A Figura 4.4 mostra um estado genérico (i, j, k) com suas taxas de transição para os estados vizinhos.

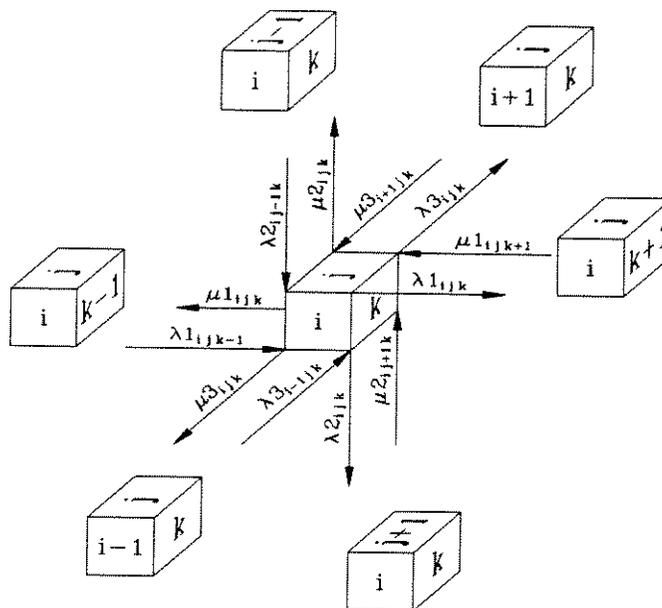


Figura 4.4 - Processo de nascimento e morte para três células.

Há seis estados vizinhos possíveis, que são: à direita (i, j, k+1); à esquerda (i, j, k-1); abaixo (i, j+1, k); acima (i, j-1, k); atrás (i+1, j, k) e na frente (i-1, j, k), dos quais se chega ao estado (i, j, k) se um canal é desocupado na célula 1, ocupado na célula 1, desocupado na célula 2, ocupado na célula 2, desocupado na célula 3, ocupado na célula 3, respectivamente.

A equação de equilíbrio de fluxo para um estado genérico (i, j, k) é:

$$\begin{aligned}
 & -(\lambda_{1ijk} + \mu_{1ijk} + \lambda_{2ijk} + \mu_{2ijk} + \lambda_{3ijk} + \mu_{3ijk})P_{ijk} + \\
 & \mu_{1ijk+1} P_{ijk+1} + \lambda_{1ijk-1} P_{ijk-1} + \mu_{2ij+1k} P_{ij+1k} + \\
 & \lambda_{2ij-1k} P_{ij-1k} + \mu_{3i+1jk} P_{i+1jk} + \lambda_{3i-1jk} P_{i-1jk} = 0
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Considerando-se N canais por célula e escrevendo-se (4.9) para cada estado, obtém-se um sistema de $(N + 1)^3$ equações com o mesmo número de incógnitas, que pode ser posto na seguinte forma matricial:

$$M \cdot P = Z \tag{4.10}$$

onde:

M é a matriz dos coeficientes (matriz estocástica) de ordem $(N + 1)^3 \times (N + 1)^3$;

P é o vetor coluna (vetor das distribuições de probabilidades) de dimensão $(N + 1)^3$;

Z é o vetor zero (vetor coluna de zeros) de dimensão $(N + 1)^3$.

Se as distribuições de probabilidades são ordenadas em P de forma que k, j e i sejam respectivamente incrementados, conforme mostra a Equação (4.12), o coeficiente da distribuição de probabilidade p_{xyz} na equação de equilíbrio (4.9) para um dado estado (i, j, k) irá constituir o elemento M_{rs} na matriz estocástica M, onde

$$r = (N + 1)^2 i + (N + 1)j + k + 1 \tag{4.11a}$$

e

$$s = (N + 1)^2 x + (N + 1)y + z + 1 \tag{4.11b}$$

$$D = \begin{bmatrix} P_{000} \\ P_{001} \\ \vdots \\ P_{00N} \\ P_{010} \\ \vdots \\ P_{01N} \\ P_{020} \\ \vdots \\ P_{02N} \\ \vdots \\ P_{0NN} \\ P_{100} \\ \vdots \\ P_{NNN} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

O número total de elementos de M é $(N + 1)^6$ dos quais $7(N + 1)^3 - 6(N - 1)^2 - 24(N - 1) - 24$ são não nulos.

Cada coluna de M soma zero pois as equações de equilíbrio são linearmente dependentes. Como p_{xyz} são funções distribuições de probabilidade, a Equação (4.13) pode ser usada para substituir uma dessas equações, de forma a eliminar a indeterminação.

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=0}^N p_{ijk} = 1 \quad (4.13)$$

Define-se então M' como uma matriz idêntica a M , com exceção de que sua n -ésima coluna é substituída por um vetor de 1's, e Z' é o vetor zero com um 1 na sua n -ésima componente. Então,

$$M' \cdot D = Z', \text{ ou}$$

$$D = M'^{-1} \cdot Z' \quad (4.14)$$

Como Z' contém apenas um elemento não nulo e é a unidade, a solução do sistema (as probabilidades p_{xyz}) é dada pela n -ésima coluna de M'^{-1} .

Para o cálculo das distribuições de probabilidade é necessário termos os valores das taxas λ_{1ijk} , λ_{2ijk} , λ_{3ijk} , μ_{1ijk} , μ_{2ijk} , μ_{3ijk} .

A seção 5 tem por objetivo esse estudo.

4.5. TAXAS DE NASCIMENTO E MORTE

4.5.1. Taxa de Morte

Consideramos que os tempos de retenção têm distribuição exponencial negativa. Sendo assim, a probabilidade de uma redução na ocupação de qualquer célula é proporcional ao número de canais ocupados na célula em questão. Normalizando o tempo médio de retenção para ser a unidade, então, para todo estado (i, j, k) temos:

$$\begin{aligned}\mu_{1ijk} &= k \\ \mu_{2ijk} &= j \\ \mu_{3ijk} &= i\end{aligned}\tag{4.15}$$

4.5.2 Taxa de Nascimento

Para cada célula será oferecido o seu próprio tráfego fixo mais uma proporção de tráfego flexível, o qual, no sistema de três células, é constituído por dois fluxos diferentes:

- . tráfego flexível com apenas dois caminhos;
- . tráfego flexível com três ou mais caminhos.

As estratégias de encaminhamento do tráfego flexível determinam a proporção de tráfego flexível que caberá a cada célula. Para que possamos estudar as três estratégias apresentadas no Capítulo 2, definimos, para cada estado, os coeficientes de encaminhamento f_{ijk} , m_{ijk} , w_{ijk} , n_{ijk} , ℓ_{ijk} e e_{ijk} tais que, para um estado (i, j, k) :

$$\begin{aligned}\lambda_{1ijk} &= A_1 + \frac{1}{2}(1 - f_{ijk})A_{12} + \frac{1}{2}(1 + m_{ijk})A_{31} + \frac{1}{3}(1 + n_{ijk})A_{123} \\ \lambda_{2ijk} &= A_2 + \frac{1}{2}(1 + f_{ijk})A_{12} + \frac{1}{2}(1 - w_{ijk})A_{23} + \frac{1}{3}(1 + \ell_{ijk})A_{123} \\ \lambda_{3ijk} &= A_3 + \frac{1}{2}(1 - m_{ijk})A_{31} + \frac{1}{2}(1 + w_{ijk})A_{23} + \frac{1}{3}(1 + e_{ijk})A_{123}\end{aligned}\tag{4.16}$$

sendo que

$$n_{ijk} + \ell_{ijk} + e_{ijk} = 0$$

e,

$$\lambda_{1ijk} + \lambda_{2ijk} + \lambda_{3ijk} = A.$$

Seja L o limiar de bloqueio com o qual as três células do sistema operam;

Sejam i, j, k o número de canais ocupados das células 3, 2 e 1, respectivamente;

Sejam $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ os desbalanceamentos respectivos das células 1, 2 e 3.

4.5.2.1 Estratégia 1

Consiste em, quando existir tráfego flexível, enviá-lo para a célula envolvida no tráfego flexível que estiver menos desbalanceada. Sendo assim, apresentaremos as várias situações possíveis:

a) $i, j, k < L$

Nessa situação não consideramos a existência de tráfego flexível. De acordo com a Equação (3.23), temos:

$$A_i = \frac{1}{3} A(1 + \beta_i) \quad i = 1, 2, 3$$

$A = \text{tráfego total do sistema}$

então:

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1 + \beta_1)$$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1 + \beta_2)$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1 + \beta_3)$$

b) $i \geq L$; $j, k < L$

$$\lambda_{3ijk} = A_3,$$

onde A_3 é dado pela Equação (3.16).

- Se $k < j$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_3}{2} + A3f_3$$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_3}{2}$$

- Se $k > j$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_3}{2}$$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_3}{2} + A3f_3$$

- Se $k = j$ e $\beta_1 = \beta_2$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_3}{2} + \frac{A3f_3}{2}$$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_3}{2} + \frac{A3f_3}{2}$$

- Se $k = j$ e $\beta_1 < \beta_2$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_3}{2} + A3f_3$$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_3}{2}$$

- Se $k = j$ e $\beta_1 > \beta_2$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_3}{2}$$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_3}{2} + A3f_3$$

onde $A2f_3$ e $A3f_3$ são dados pelas Equações (3.9) e (3.10).

c) $j \geq L$; $i, k < L$

$$\lambda_{2ijk} = A_2,$$

onde A_2 é dado pela Equação (3.16).

- Se $k < i$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_2}{2} + A3f_2$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_2}{2}$$

- Se $k > i$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_2}{2}$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_2}{2} + A3f_2$$

- Se $k = i$ e $\beta_1 < \beta_3$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_2}{2} + A3f_2$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_2}{2}$$

- Se $k = i$ e $\beta_1 > \beta_3$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_2}{2}$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_2}{2} + A3f_2$$

- Se $k = i$ e $\beta_1 = \beta_3$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_2}{2} + \frac{A3f_2}{2}$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_2}{2} + \frac{A3f_2}{2}$$

onde $A2f_2$ e $A3f_2$ são dados pelas Equações (3.9) e (3.10).

d) $k \geq L$; $i, j < L$

$$\lambda_{1ijk} = A_1,$$

onde A_1 é dado pela Equação (3.16).

- Se $j < i$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_1}{2} + A3f_1$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_1}{2}$$

- Se $j > i$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_1}{2}$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_1}{2} + A3f_1$$

- Se $j = i$ e $\beta_2 < \beta_3$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_1}{2} + A3f_1$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_1}{2}$$

- Se $j = i$ e $\beta_2 > \beta_3$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_1}{2}$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_1}{2} + A3f_1$$

- Se $j = i$ e $\beta_2 = \beta_3$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_1}{2} + \frac{A3f_1}{2}$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_1}{2} + \frac{A3f_1}{2}$$

onde $A2f_1$ e $A3f_1$ são dados pelas Equações (3.9) e (3.10).

- e) Se temos duas ou três células cujo número de canais ocupados seja igual ou superior ao limiar de bloqueio L , a estratégia de encaminhamento de tráfego flexível será aplicada às três células do sistema, conforme a Tabela 1, que apresenta os valores dos coeficientes de encaminhamento.

Tabela 1 - Coeficientes de encaminhamento para a Estratégia 1 quando duas ou três células apresentam um número de canais ocupados igual ou superior ao limiar de bloqueio L.

<i>estados instantâneos do sistema</i>	<i>desbalanceamentos individuais</i>	<i>coeficientes de encaminhamento</i>					
		<i>f</i>	<i>m</i>	<i>w</i>	<i>n</i>	<i>ℓ</i>	<i>e</i>
$(i = j = k)$	$\beta_3 = \beta_2 = \beta_1$	0	0	0	0	0	0
	$\beta_3 > \beta_2 = \beta_1$	0	1	-1	0,5	0,5	-1
	$\beta_3 < \beta_2 = \beta_1$	0	-1	1	-1	-1	2
	$\beta_3 = \beta_2 > \beta_1$	-1	1	0	2	-1	-1
	$\beta_3 = \beta_2 < \beta_1$	1	-1	0	-1	0,5	0,5
	$\beta_3 = \beta_1 > \beta_2$	1	0	-1	-1	2	-1
	$\beta_3 = \beta_1 < \beta_2$	-1	0	1	0,5	-1	0,5
	$\beta_3 > \beta_2 > \beta_1$	-1	1	-1	2	-1	-1
	$\beta_3 > \beta_1 > \beta_2$	1	1	-1	-1	2	-1
	$\beta_2 > \beta_1 > \beta_3$	-1	-1	1	-1	-1	2
	$\beta_2 > \beta_3 > \beta_1$	-1	1	1	2	-1	-1
	$\beta_1 > \beta_3 > \beta_2$	1	-1	-1	-1	2	-1
	$\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$	1	-1	1	-1	-1	2
$(i > j = k)$	$\beta_1 = \beta_2$	0	1	-1	0,5	0,5	-1
	$\beta_1 > \beta_2$	1	1	-1	-1	2	-1
	$\beta_1 < \beta_2$	-1	1	-1	2	-1	-1
$(i < j = k)$	$\beta_1 = \beta_2$	0	-1	1	-1	-1	2
	$\beta_1 > \beta_2$	1	-1	1	-1	-1	2
	$\beta_1 < \beta_2$	-1	-1	1	-1	-1	2
$(i = j > k)$	$\beta_2 = \beta_3$	-1	1	0	2	-1	-1
	$\beta_2 > \beta_3$	-1	1	1	2	-1	-1
	$\beta_2 < \beta_3$	-1	1	-1	2	-1	-1
$(i = j < k)$	$\beta_2 = \beta_3$	1	-1	0	-1	0,5	0,5
	$\beta_2 > \beta_3$	1	-1	1	-1	-1	2
	$\beta_2 < \beta_3$	1	-1	-1	-1	2	-1
$(i = k > j)$	$\beta_1 = \beta_3$	1	0	-1	-1	2	-1
	$\beta_1 > \beta_3$	1	-1	-1	-1	2	-1
	$\beta_1 < \beta_3$	1	1	-1	-1	2	-1
$(i = k < j)$	$\beta_1 = \beta_3$	-1	0	1	0,5	-1	0,5
	$\beta_1 > \beta_3$	-1	-1	1	-1	-1	2
	$\beta_1 < \beta_3$	-1	1	1	2	-1	-1
$(i > j > k)$	não importam seus valores	-1	1	-1	2	-1	-1
$(i > k > j)$		1	1	-1	-1	2	-1
$(j > k > i)$		-1	-1	1	-1	-1	2
$(j > i > k)$		-1	1	1	2	-1	-1
$(k > i > j)$		1	-1	-1	-1	2	-1
$(k > j > i)$		1	-1	1	-1	-1	2

4.5.2.2 Estratégia 2

Não leva em consideração o desbalanceamento das células, repartindo o tráfego flexível igualmente entre as células em questão. Sendo assim, apresentaremos as várias situações possíveis.

a) $i, j, k < L$

Como para a Estratégia 1, temos:

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) \quad A = \text{tráfego total do sistema}$$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2)$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3)$$

b) $i \geq L; j, k < L$

$$\lambda_{3ijk} = A_3,$$

onde A_3 é dado pela Equação (3.16).

- Se $k < j$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A_2 f_3}{2} + A_3 f_3$$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A_2 f_3}{2}$$

- Se $k > j$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A_2 f_3}{2}$$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A_2 f_3}{2} + A_3 f_3$$

- Se $k = j$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A_2 f_3}{2} + \frac{A_3 f_3}{2}$$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A_2 f_3}{2} + \frac{A_3 f_3}{2}$$

c) $j \geq L$; $i, k < L$

$$\lambda_{2ijk} = A_2,$$

onde A_2 é dado pela Equação (3.16).

- Se $k < i$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_2}{2} + A3f_2$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_2}{2}$$

- Se $k > i$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_2}{2}$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_2}{2} + A3f_2$$

- Se $k = i$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_2}{2} + \frac{A3f_2}{2}$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_2}{2} + \frac{A3f_2}{2}$$

d) $k \geq L$; $i, j < L$

$$\lambda_{1ijk} = A_1,$$

onde A_1 é dado pela Equação (3.16).

- Se $j < i$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_1}{2} + A3f_1$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_1}{2}$$

- Se $j > i$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_1}{2}$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_1}{2} + A3f_1$$

- Se $j = i$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_1}{2} + \frac{A3f_1}{2}$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_1}{2} + \frac{A3f_1}{2}$$

onde $A2f_3$, $A3f_3$, $A2f_2$, $A3f_2$, $A2f_1$ e $A3f_1$ são dados pelas Equações (3.9) e (3.10).

- e) Se temos duas ou três células cujo número de canais ocupados seja igual ou superior ao limiar de bloqueio L , a estratégia de encaminhamento de tráfego flexível será aplicada às três células do sistema, conforme a Tabela 2, que apresenta os valores dos coeficientes de encaminhamento.

Tabela 2 - Coeficientes de encaminhamento para a Estratégia 2 quando duas ou três células apresentam um número de canais ocupados igual ou superior ao limiar de bloqueio L .

<i>estados instantâneos do sistema</i>	<i>coeficientes de encaminhamento</i>					
	<i>f</i>	<i>m</i>	<i>w</i>	<i>n</i>	<i>ℓ</i>	<i>e</i>
$(i = j = k)$	0	0	0	0	0	0
$(i > j = k)$	0	1	-1	0,5	0,5	-1
$(i < j = k)$	0	-1	1	-1	-1	2
$(i = j > k)$	-1	1	0	2	-1	-1
$(i = j < k)$	1	-1	0	-1	0,5	0,5
$(i = k > j)$	1	0	-1	-1	2	-1
$(i = k < j)$	-1	0	1	0,5	-1	0,5
$(i > j > k)$	-1	1	-1	2	-1	-1
$(i > k > j)$	1	1	-1	-1	2	-1
$(j > k > i)$	-1	-1	1	-1	-1	2
$(j > i > k)$	-1	1	1	2	-1	-1
$(k > i > j)$	1	-1	-1	-1	2	-1
$(k > j > i)$	1	-1	1	-1	-1	2

4.5.2.3 Estratégia 3

O tráfego flexível permanece na célula de primeira opção, mantendo o desbalanceamento do sistema. Sendo assim, apresentaremos as várias situações possíveis:

a) $i, j, k < L$

Como para as Estratégias 1 e 2, temos:

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1)$$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2)$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3)$$

b) $i \geq L; j, k < L$

$$\lambda_{3ijk} = A_3,$$

onde A_3 é dado pela Equação (3.16).

- Se $k < j$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A_2 f_3}{2} + A_3 f_3$$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A_2 f_3}{2}$$

- Se $k > j$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A_2 f_3}{2}$$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A_2 f_3}{2} + A_3 f_3$$

- Se $k = j$ e $\beta_1 = \beta_2$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A_2 f_3}{2} + \frac{A_3 f_3}{2}$$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A_2 f_3}{2} + \frac{A_3 f_3}{2}$$

- Se $k = j$ e $\beta_1 < \beta_2$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_3}{2}$$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_3}{2} + A3f_3$$

- Se $k = j$ e $\beta_1 > \beta_2$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_3}{2} + A3f_3$$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_3}{2}$$

onde $A2f_3$ e $A3f_3$ são dados pelas Equações (3.9) e (3.10).

c) $j \geq L$; $i, k < L$

$$\lambda_{2ijk} = A_2,$$

onde A_2 é dado pela Equação (3.16).

- Se $k < i$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_2}{2} + A3f_2$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_2}{2}$$

- Se $k > i$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_2}{2}$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_2}{2} + A3f_2$$

- Se $k = i$ e $\beta_1 < \beta_3$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_2}{2}$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_2}{2} + A3f_2$$

- Se $k = i$ e $\beta_1 > \beta_3$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_2}{2} + A3f_2$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_2}{2}$$

- Se $k = i$ e $\beta_1 = \beta_3$

$$\lambda_{1ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_1) + \frac{A2f_2}{2} + \frac{A3f_2}{2}$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_2}{2} + \frac{A3f_2}{2}$$

onde $A2f_2$ e $A3f_2$ são dados pelas Equações (3.9) e (3.10).

d) $k \geq L$; $i, j < L$

$$\lambda_{1ijk} = A_1,$$

onde A_1 é dado pela Equação (3.16).

- Se $j < i$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_1}{2} + A3f_1$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_1}{2}$$

- Se $j > i$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_1}{2}$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_1}{2} + A3f_1$$

- Se $j = i$ e $\beta_2 < \beta_3$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_1}{2}$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_1}{2} + A3f_1$$

- Se $j = i$ e $\beta_2 > \beta_3$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_1}{2} + A3f_1$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_1}{2}$$

- Se $j = i$ e $\beta_2 = \beta_3$

$$\lambda_{2ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_2) + \frac{A2f_1}{2} + \frac{A3f_1}{2}$$

$$\lambda_{3ijk} = \frac{1}{3} A(1+\beta_3) + \frac{A2f_1}{2} + \frac{A3f_1}{2}$$

onde $A2f_1$ e $A3f_1$ são dados pelas Equações (3.9) e (3.10).

- e) Se temos duas ou três células cujo número de canais ocupados seja igual ou superior ao limiar de bloqueio L , a estratégia de encaminhamento de tráfego flexível será aplicada às três células do sistema, conforme a Tabela 3, que apresenta os valores dos coeficientes de encaminhamento.

4.6. MEDIDAS DE DESEMPENHO

Neste item serão calculadas as probabilidades de bloqueio:

- B_i - probabilidade da célula i estar bloqueada;
- $B_{i,i\oplus 1}$ - probabilidade das células i e $i\oplus 1$ estarem bloqueadas simultaneamente;
- $B_{i,i\oplus 1,i\oplus 2}$ - probabilidade das células i , $i\oplus 1$ e $i\oplus 2$ estarem bloqueadas simultaneamente.

Tendo-se esses valores, obtemos a Probabilidade de Bloqueio Médio do sistema (B_m), dada pela Equação (4.1), através da qual será analisado o desempenho do sistema.

As probabilidades de bloqueio são calculadas a partir das probabilidades dos estados de equilíbrio do processo de Markov, como se segue:

Tabela 3 - Coeficientes de encaminhamento para a Estratégia 3 quando duas ou três células apresentam um número de canais ocupados igual ou superior ao limiar de bloqueio L.

<i>estados instantâneos do sistema</i>	<i>desbalanceamentos individuais</i>	<i>coeficientes de encaminhamento</i>					
		<i>f</i>	<i>m</i>	<i>w</i>	<i>n</i>	<i>ℓ</i>	<i>e</i>
$(i = j = k)$	$\beta_3 = \beta_2 = \beta_1$	0	0	0	0	0	0
	$\beta_3 > \beta_2 = \beta_1$	0	-1	1	-1	-1	2
	$\beta_3 < \beta_2 = \beta_1$	0	1	-1	0,5	0,5	-1
	$\beta_3 = \beta_2 > \beta_1$	1	-1	0	-1	0,5	0,5
	$\beta_3 = \beta_2 < \beta_1$	-1	1	0	2	-1	-1
	$\beta_3 = \beta_1 > \beta_2$	-1	0	1	0,5	-1	0,5
	$\beta_3 = \beta_1 < \beta_2$	1	0	-1	-1	2	-1
	$\beta_3 > \beta_2 > \beta_1$	1	-1	1	-1	-1	2
	$\beta_3 > \beta_1 > \beta_2$	-1	-1	1	-1	-1	2
	$\beta_2 > \beta_1 > \beta_3$	1	1	-1	-1	2	-1
	$\beta_2 > \beta_3 > \beta_1$	1	-1	-1	-1	2	-1
	$\beta_1 > \beta_3 > \beta_2$	-1	1	1	2	-1	-1
	$\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$	-1	1	-1	2	-1	-1
$(i > j = k)$	$\beta_1 = \beta_2$	0	1	-1	0,5	0,5	-1
	$\beta_1 > \beta_2$	-1	1	-1	2	-1	-1
	$\beta_1 < \beta_2$	1	1	-1	-1	2	-1
$(i < j = k)$	$\beta_1 = \beta_2$	0	-1	1	-1	-1	2
	$\beta_1 > \beta_2$	-1	-1	1	-1	-1	2
	$\beta_1 < \beta_2$	1	-1	1	-1	-1	2
$(i = j > k)$	$\beta_2 = \beta_3$	-1	1	0	2	-1	-1
	$\beta_2 > \beta_3$	-1	1	-1	2	-1	-1
	$\beta_2 < \beta_3$	-1	1	1	2	-1	-1
$(i = j < k)$	$\beta_2 = \beta_3$	1	-1	0	-1	0,5	0,5
	$\beta_2 > \beta_3$	1	-1	-1	-1	2	-1
	$\beta_2 < \beta_3$	1	-1	1	-1	-1	2
$(i = k > j)$	$\beta_1 = \beta_3$	1	0	-1	-1	2	-1
	$\beta_1 > \beta_3$	1	1	-1	-1	2	-1
	$\beta_1 < \beta_3$	1	-1	-1	-1	2	-1
$(i = k < j)$	$\beta_1 = \beta_3$	-1	0	1	0,5	-1	0,5
	$\beta_1 > \beta_3$	-1	1	1	2	-1	-1
	$\beta_1 < \beta_3$	-1	-1	1	-1	-1	2
$(i > j > k)$	não importam seus valores	-1	1	-1	2	-1	-1
$(i > k > j)$		1	1	-1	-1	2	-1
$(j > k > i)$		-1	-1	1	-1	-1	2
$(j > i > k)$		-1	1	1	2	-1	-1
$(k > i > j)$		1	-1	-1	-1	2	-1
$(k > j > i)$		1	-1	1	-1	-1	2

$$B_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{ijN}$$

$$B_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N p_{iNk}$$

$$B_3 = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N p_{Njk}$$

$$B_{12} = \sum_{i=1}^N p_{iNN}$$

$$B_{23} = \sum_{k=1}^N p_{NNk}$$

$$B_{31} = \sum_{j=1}^N p_{NjN}$$

$$B_{123} = p_{NNN} \tag{4.17}$$

onde N é o número de canais disponíveis para cada célula.

4.7. MÉTODOS DE SOLUÇÃO

Existem dois casos especiais, descritos a seguir, que tornam possível verificar se as técnicas de computação empregadas estão corretas.

4.7.1. Quando Não há Flexibilidade

Se $\gamma = 0$ as três células estão completamente isoladas entre si e então as

probabilidades de bloqueio podem ser expressas em termos da fórmula Erlang-B

$$\begin{aligned} B_1 &= E(A_1, N) \\ B_2 &= E(A_2, N) \\ B_3 &= E(A_3, N) \end{aligned} \tag{4.18}$$

4.7.2. Quando a Flexibilidade é Total

Se $\gamma = 1$ as três células podem ser consideradas como sendo uma, com $3N$ canais, se todos os caminhos possíveis são utilizados. Novamente pode-se aplicar a fórmula de Erlang-B

$$B_m = E(A, 3N) \tag{4.19}$$

4.7.3. Métodos Computacionais para o Caso Geral

Na Figura 4.5 temos o diagrama de blocos do programa utilizado para a avaliação do desempenho do sistema.

A seguir descrevem-se os respectivos blocos:

- **Dados** : este bloco interage com o usuário para a entrada de dados. São considerados dados de entrada os seguintes parâmetros:
 - Número N de canais por célula ($N \geq 0$);
 - Tráfego total A do sistema ($A \geq 0$ Erlang);
 - Proporção γ de tráfego flexível ($0 \leq \gamma \leq 1$);
 - Desbalanceamento β_i , $i = 1, 2, 3$, das células.
($-1 \leq \beta_i \leq 2$, $i = 1, 2, 3$, $\sum_{i=1}^3 \beta_i = 0$);

- Limiar L de bloqueio ($L \geq 0$);
- Opção O de dois ($O = 0$) ou três ($O = 1$) caminhos para o tráfego flexível.

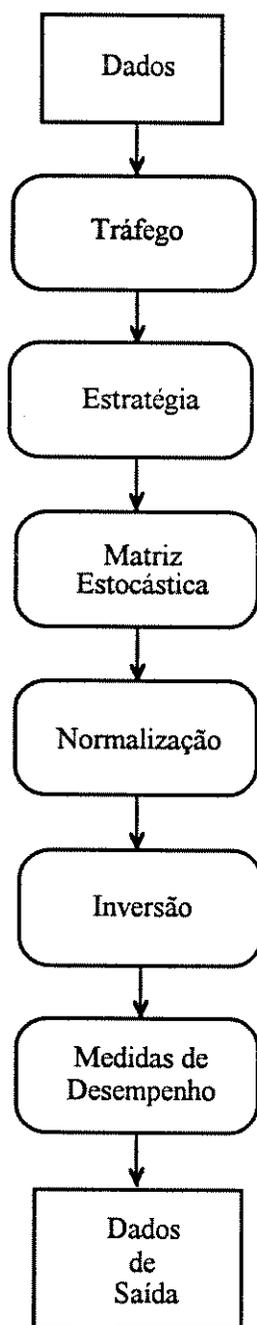


Figura 4.5 - Diagrama de blocos do programa utilizado para avaliação do desempenho do sistema.

– **Tráfego** : este bloco realiza três etapas:

- i) Verifica a consistência dos dados de entrada, enviando mensagem de erro e interrompendo a execução do programa em caso de inconsistência;
- ii) Calcula δ em função de γ através da Equação (3.21). δ é nulo se $O = 0$;
- iii) São efetuados os seguintes cálculos:
 - A_i , $i = 1, 2, 3$ através da Equação (3.16);
 - $A2f_i$, $i = 1, 2, 3$ através da Equação (3.9);
 - $A3f_i$, $i = 1, 2, 3$ através da Equação (3.10);
 - A_{12} , A_{23} , A_{31} através da Equação (3.17);
 - A_{123} através da Equação (3.19).

– **Estratégia** : este bloco calcula, para cada uma das três estratégias, a taxa de morte e a taxa de nascimento, conforme descrito nos itens 4.5.1 e 4.5.2.

– **Matriz estocástica, normalização e inversão** : conforme descrito no item 4.4, são efetuadas três etapas:

- i) Monta-se a matriz estocástica M ;
- ii) Monta-se M' , que é uma matriz idêntica a M , com exceção de que sua n -ésima coluna é substituída por um vetor de 1's;
- iii) Inverte-se M' . A solução do sistema (as probabilidades p_{xyz}) é dada pela n -ésima coluna de M'^{-1} .

– **Medidas de desempenho** : este bloco calcula as probabilidades de bloqueio B_i , $B_{i,i\oplus 1}$, $B_{i,i\oplus 1,i\oplus 2}$, onde $i = 1, 2, 3$, através da Equação (4.17). Em seguida, calcula B_m através da Equação (4.1).

– **Dados de saída** : este bloco fornece os dados de entrada e os seguintes dados de saída: B_i , $i = 1, 2, 3$ e B_m .

4.8. CONCLUSÕES

Neste capítulo estudou-se o Processo de Markov aplicado a um sistema constituído de três células.

Foram calculadas todas as variáveis necessárias para o cálculo do Bloqueio Médio, B_m , através do qual será analisado o desempenho do sistema no Capítulo 5.

Apresentaram-se os casos particulares, necessários para testar a confiabilidade do programa computacional desenvolvido e, em seguida, seu diagrama de blocos, comentado de uma maneira sucinta.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Neste capítulo analisaremos o desempenho do sistema de rádio móvel celular constituído por três células mutuamente adjacentes, ao se aplicar a Técnica de Variação do Limiar de Bloqueio.

Os resultados, mostrados através de gráficos, foram obtidos por programa computacional, que implementa de maneira rigorosa as três estratégias propostas, tendo-se a opção tráfego flexível com apenas dois caminhos e tráfego flexível com dois e três caminhos.

5.1. INTRODUÇÃO

A medida de desempenho do sistema é o bloqueio médio, que será dado em função dos seguintes parâmetros:

- Tráfego total do sistema, A ;
- Desbalanceamento global do sistema, β ;
- Número de canais por célula N ;
- Limiar de Bloqueio L ;
- Flexibilidade do sistema γ ;
- Opção O , onde considera-se o tráfego flexível como tendo apenas dois caminhos, ou então dois e três caminhos.

Vale salientar que o parâmetro desbalanceamento global, β , é multivariável, sendo dado como:

$$\beta^2 = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^3 \beta_i^2$$

onde β_i é o desbalanceamento individual de cada célula, e

$$\sum_{i=1}^3 \beta_i = 0$$

O uso de um parâmetro, ao invés de dois, facilita a visualização dos resultados ao mesmo tempo que ajuda a sua interpretação.

Nos gráficos que se referem ao sistema desbalanceado, utilizamos o valor $\beta = 0,5$ ($\beta_1 = -0,5$; $\beta_2 = -0,5$; $\beta_3 = 1$).

Nos gráficos onde o desbalanceamento global do sistema é a abcissa, utilizamos a condição $-\beta_1 = -\beta_2 = \frac{\beta_3}{2} = \beta$.

Os resultados apresentados nesse capítulo foram obtidos através da manipulação desses parâmetros, variando-os exaustivamente, a fim de se poder estudar os seguintes aspectos:

- Há uma grande diferença de desempenho entre as três estratégias propostas? Em que condições essa diferença é mais acentuada?
- Como varia o desempenho do sistema com a variação do limiar de bloqueio? Pode existir algum valor interessante de limiar de bloqueio para meu sistema específico, abaixo do qual o desempenho do sistema pouco se altere?
- Como varia o desempenho do sistema com a introdução do terceiro caminho no tráfego flexível? O acréscimo na complexidade do sistema compensa o ganho no desempenho? Em quais condições?

Com o fim de estruturar os resultados em função dos diversos parâmetros envolvidos, dividiremos o capítulo em quatro partes, onde serão abordados os seguintes tópicos:

- 1) Bloqueio Médio versus Flexibilidade;
- 2) Bloqueio Médio versus Desbalanceamento;
- 3) Bloqueio Médio versus Tráfego;
- 4) Conclusões.

A simulação foi realizada para um sistema onde cada célula tem seis canais ($N = 6$). Sendo assim, o número total de canais do sistema é 18. O programa computacional tem capacidade para simular um sistema que tenha no máximo 8 canais por célula. Esta limitação se deve única e exclusivamente à capacidade da máquina onde são executados os programas. De fato, N canais por célula implicam em cadeias de Markov com um conjunto de $(N + 1)^3$ estados, significando, para $N = 8$, um conjunto de 729 equações com o mesmo número de incógnitas a serem resolvidas. À medida que se aumenta o número de canais por célula o processo de solução vai-se tornando cada vez mais lento a ponto de comprometer a obtenção de resultados em tempo adequado. O número $N = 6$ satisfaz o quesito custo x benefício, e mostra-se suficiente para possíveis conclusões gerais acerca do desempenho do sistema em função dos diversos parâmetros.

5.2. BLOQUEIO MÉDIO VERSUS FLEXIBILIDADE

Consideremos um sistema onde o tráfego total seja de 11 erl.

Analisaremos primeiramente o caso do sistema estar balanceado, isto é, $\beta = 0$, o que implica $\beta_i = 0$, $i = 1, 2, 3$. Nesta condição, as três estratégias são coincidentes. Em seguida, consideraremos o sistema desbalanceado, com desbalanceamento global $\beta = 0,5$. Para ambas as condições, estudaremos o desempenho do sistema para a variação da flexibilidade ($0 \leq \gamma \leq 1$). Note que para $\beta \neq 0$ deve ser escolhida uma distribuição de tráfego tal que os desbalanceamentos individuais levem à condição do β desejado. A priori, qualquer distribuição satisfazendo $\beta = k$ pode ser usada.

5.2.1. Sistema Balanceado

Na Figura 5.1 temos o gráfico "Bloqueio Médio x Flexibilidade" para o caso do tráfego flexível ter apenas dois caminhos. Tanto para $\gamma = 0$ como para o limiar maior que 6 o sistema funciona sem a aplicação das estratégias, sendo o bloqueio médio igual a 0,0937. Nesta condição as três células estão mutuamente isoladas e então a fórmula

Erlang-B $E\left(\frac{11}{3}, 6\right)$ se aplica.

Este gráfico sugere que, para esse caso, o valor do limiar poderia ser estipulado

como 4 ou 5, pois valores menores que 4 apresentam um valor de bloqueio médio praticamente coincidente.

Para uma flexibilidade de 30%, que é um valor bastante plausível de ser encontrado nos sistemas de telefonia celular em funcionamento, o bloqueio médio para o limiar 0 é 6,14%, para o limiar 6 é 7,47% e quando não há aplicação de estratégia, o bloqueio médio é 9,37%. Então, com a aplicação das estratégias podemos ter uma melhora do bloqueio médio de até 53%.

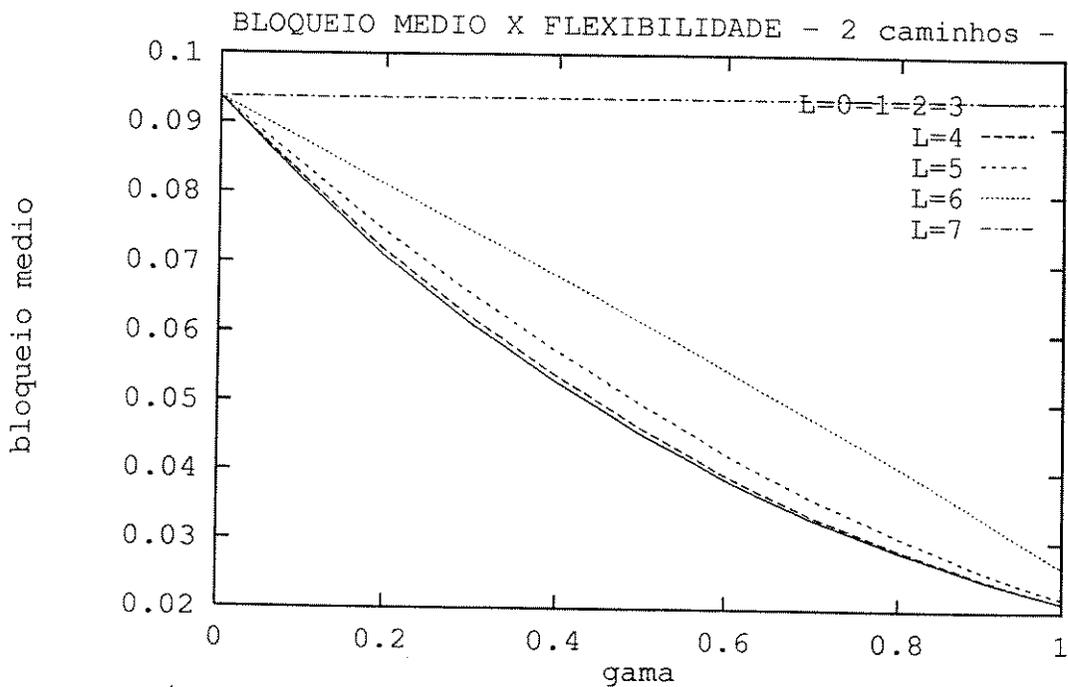


Figura 5.1 - Bloqueio médio versus flexibilidade - 2 caminhos.

Na Figura 5.2 temos o gráfico "Bloqueio Médio x Flexibilidade", agora para o caso do tráfego flexível ter dois e três caminhos. Os valores de bloqueio médio obtidos são muito próximos dos obtidos na Figura 5.1, o que nos leva a concluir que para um sistema balanceado o tráfego de 11 erl. é ainda insuficiente para que o adição do terceiro caminho altere significativamente o bloqueio médio.

Note-se na Figura 5.2 que para a flexibilidade total ($\gamma = 1$) o valor do bloqueio médio é 0,0148, independentemente do valor do limiar escolhido. Esse resultado é teoricamente esperado, pois, na condição do tráfego flexível ter dois e três caminhos e flexibilidade total, é como se as três células do sistema formassem uma única célula, com 18 canais disponíveis. Aqui, também, a fórmula Erlang B $E(11,18)$ se aplica.

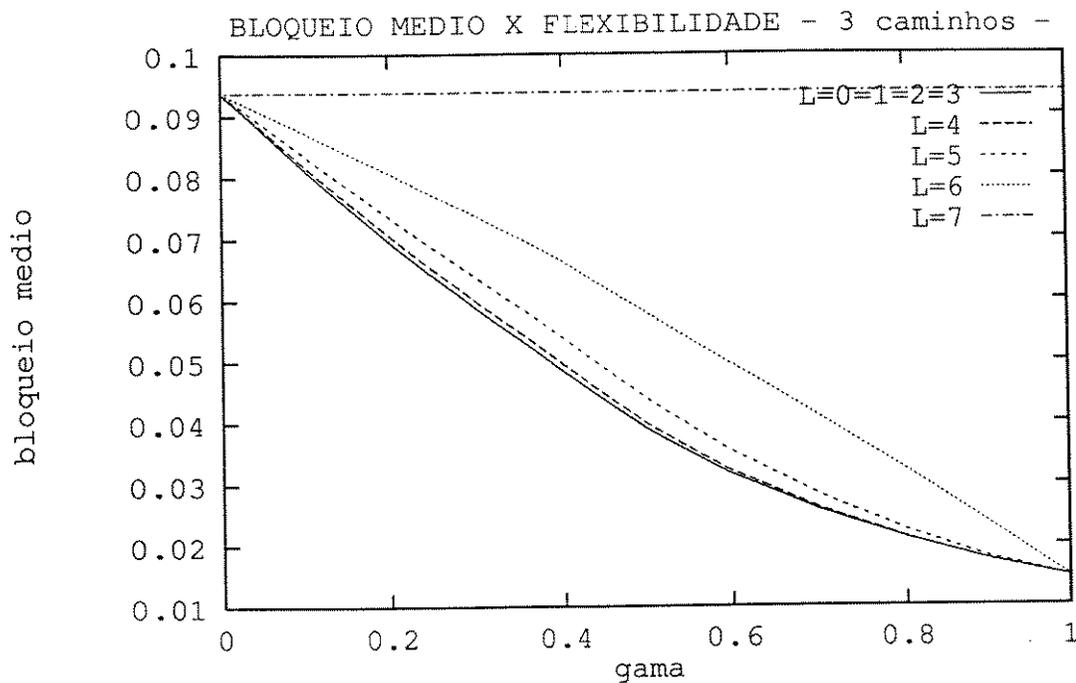


Figura 5.2 - Bloqueio médio versus flexibilidade - 3 caminhos.

5.2.2. Sistema Desbalanceado ($\beta = 0,5$)

Consideraremos nesse item os três aspectos seguintes:

- 1) a comparação do desempenho das três estratégias para a variação da flexibilidade;
- 2) a melhora do desempenho do sistema com a introdução do terceiro caminho no tráfego flexível;
- 3) dada uma das três estratégias, a comparação do desempenho do sistema para os diversos limiares.

5.2.2.1. Comparação entre as estratégias

Sejam a Figura 5.3 e a Figura 5.4. Podemos concluir que para essas condições do sistema (6 canais por célula e tráfego total 11 erl.) as três estratégias têm um desempenho muito similar, sendo que quanto menor o limiar de bloqueio escolhido, maior a diferença

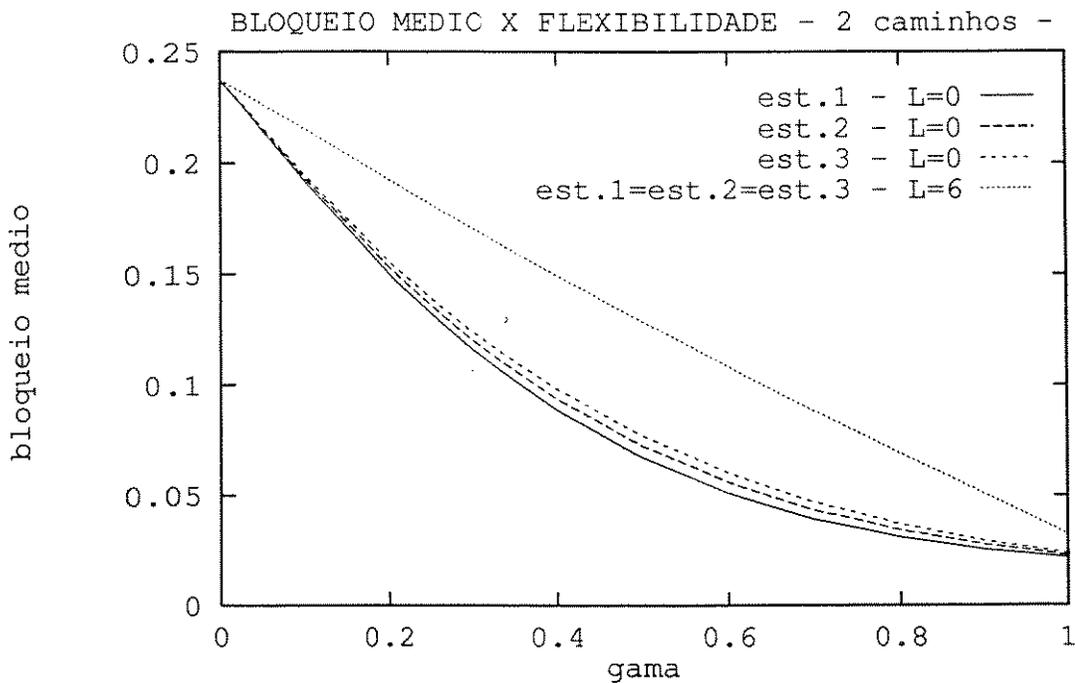


Figura 5.3 - Bloqueio médio versus flexibilidade - 2 caminhos.

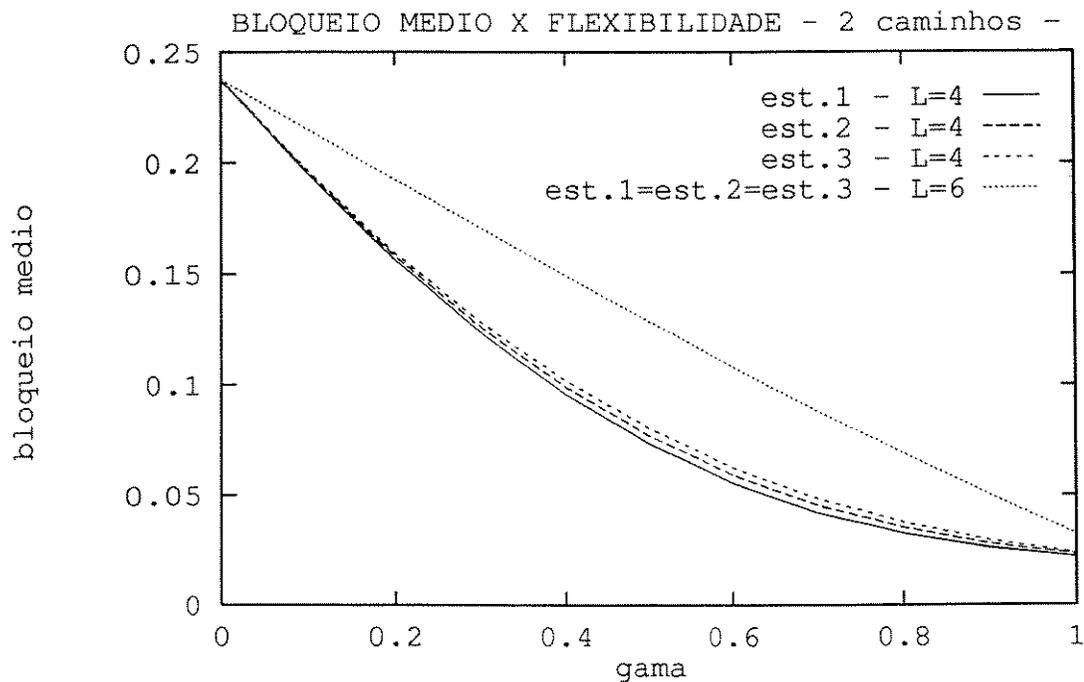


Figura 5.4 - Bloqueio médio versus flexibilidade - 2 caminhos.

entre as estratégias. Para o limiar 6, as três estratégias apresentam bloqueios médios idênticos. Para uma flexibilidade de 30% e para o limiar de bloqueio 0, temos os seguintes valores de bloqueio médio: para a estratégia 1, 11,63%; para a estratégia 2, 12,05% e para a

estratégia 3, 12,42%. Ou seja, no caso em que a diferença entre as estratégias é maior (limiar 0), a diferença de desempenho entre as estratégias não ultrapassa 0,8% em termos absolutos (ou uma melhora de no máximo 7%).

Se considerarmos a Figura 5.5 e a Figura 5.6 chegaremos às mesmas conclusões.

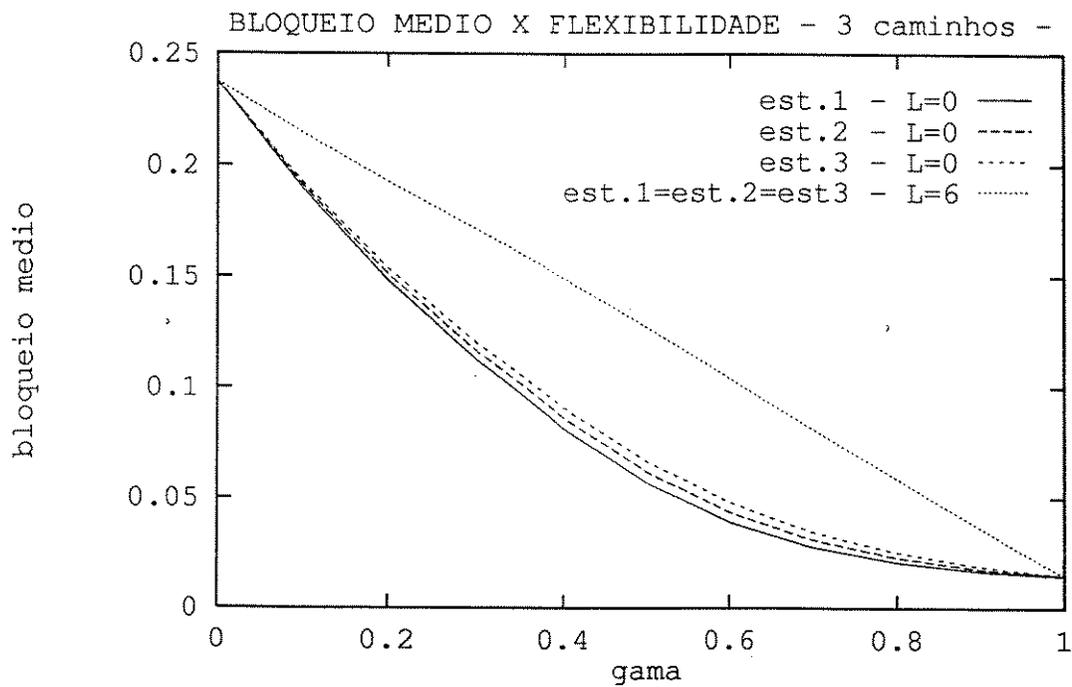


Figura 5.5 - Bloqueio médio versus flexibilidade - 3 caminhos.

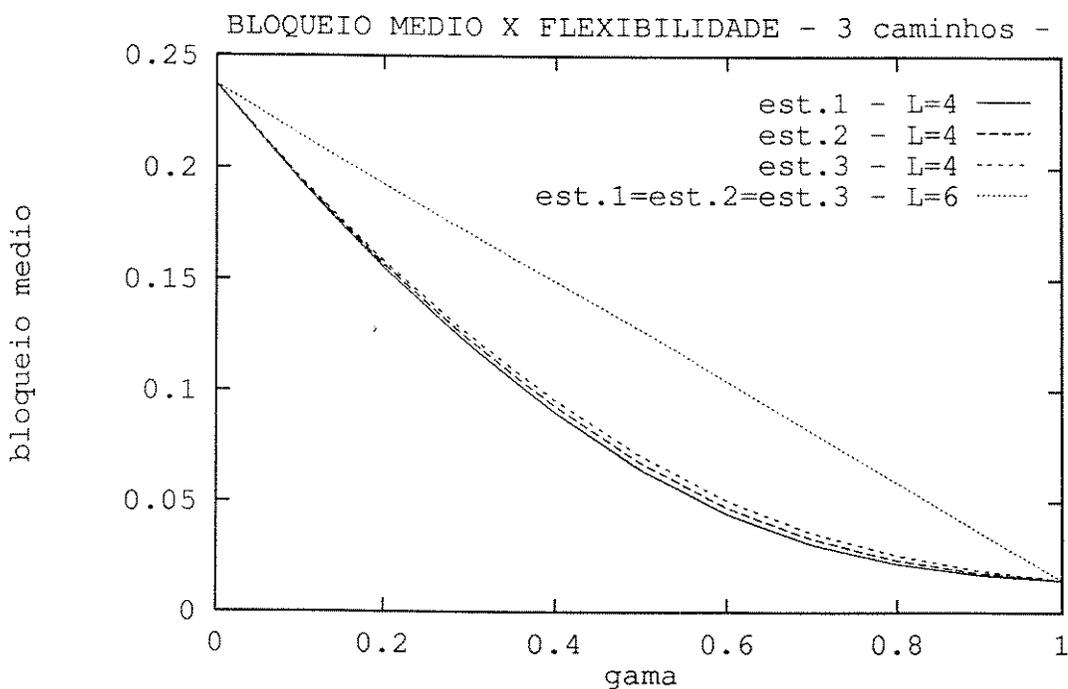


Figura 5.6 - Bloqueio médio versus flexibilidade - 3 caminhos.

5.2.2.2. Introdução do terceiro caminho no tráfego flexível

Comparando-se a Figura 5.3 e a Figura 5.4 com a Figura 5.5 e a Figura 5.6, respectivamente, concluímos que a melhora do desempenho do sistema com a introdução do terceiro caminho aumenta com a flexibilidade do sistema. Consideremos então, por exemplo, o limiar de bloqueio 4 e uma flexibilidade de 30%.

Para a estratégia 1, com a introdução do terceiro caminho o bloqueio médio passa de 12,38% para 12,09%.

Para a estratégia 2, o bloqueio médio passa de 12,62% para 12,30%.

Para a estratégia 3, o bloqueio médio passa de 12,84% para 12,51%.

Concluímos então que para estas condições do sistema (6 canais por célula e tráfego total de 11 erl.) a introdução do terceiro caminho não altera significativamente o desempenho do sistema.

5.2.2.3. Comparação entre os diversos limiares para a estratégia 2

Seja a Figura 5.7. Podemos concluir que para um limiar menor ou igual a 4 o desempenho do sistema é muito similar. Como ocorre com todas as figuras onde temos vários limiares de bloqueio, podemos dizer que o maior ganho no desempenho do sistema ocorre quando passamos do limiar $N + 1$ para o limiar N . O segundo maior ganho, quando passamos do limiar N para o $N - 1$, e assim sucessivamente, até o limiar 0.

Seja a flexibilidade 30%. Temos os seguintes valores de bloqueio médio, para os diversos limiares:

- limiar 0 \cong limiar 1 - bloqueio médio 11,62%
- limiar 2 - bloqueio médio 11,63%
- limiar 3 - bloqueio médio 11,75%
- limiar 4 - bloqueio médio 12,30%
- limiar 5 - bloqueio médio 13,83%
- limiar 6 - bloqueio médio 17,10%
- limiar 7 - bloqueio médio 23,73%

Para o limiar 0, que é o caso em que o desempenho do sistema é melhor, temos uma melhora no desempenho do sistema de mais de 100% com a aplicação da estratégia, o que é bastante significativo.

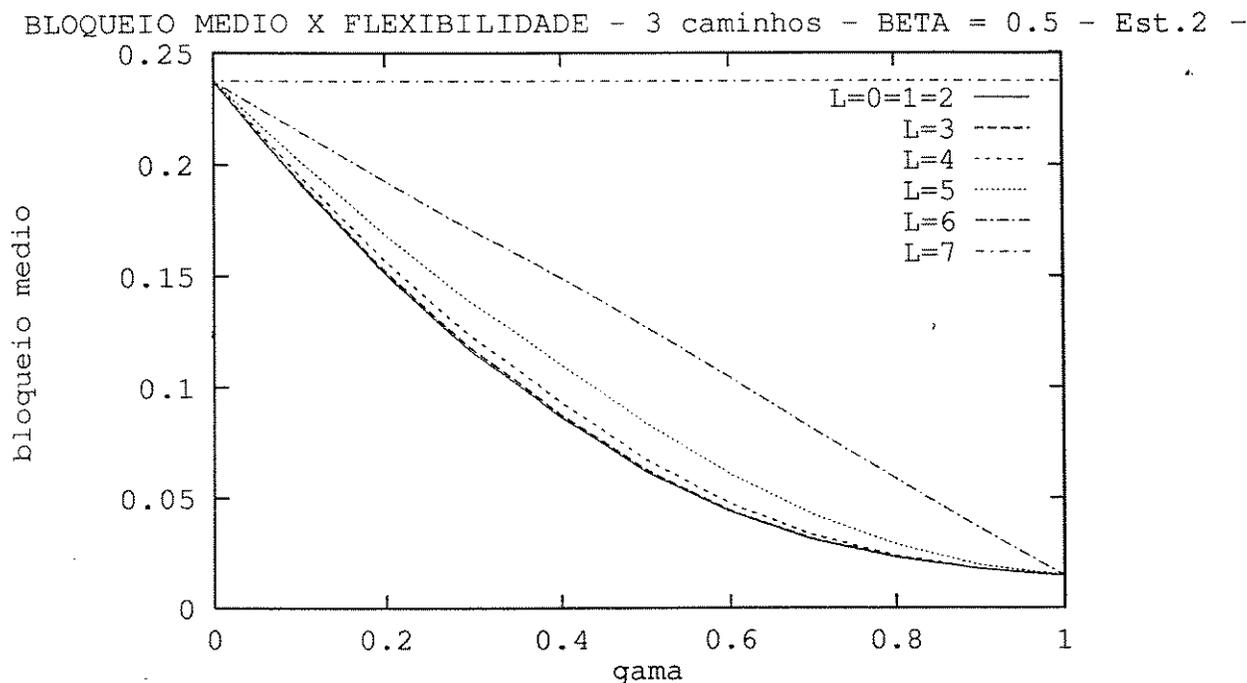


Figura 5.7 - Bloqueio médio versus flexibilidade - 3 caminhos - Estratégia 2 - $\beta = 0,5$.

5.3. BLOQUEIO MÉDIO VERSUS DESBALANCEAMENTO

Seja um sistema celular com 6 canais por célula e com tráfego total de 6.33 erl. Manteremos a flexibilidade do sistema constante, igual a 0,5, para que possamos estudar o desempenho do sistema com a variação do desbalanceamento global β .

Nesse item estudaremos os seguintes aspectos:

- 1) dada uma das três estratégias, analisaremos o desempenho do sistema quando se varia o balanceamento, para os diversos valores de limiar de bloqueio;
- 2) para esta mesma estratégia, analisaremos a melhora do desempenho do sistema com a introdução do terceiro caminho no tráfego flexível;
- 3) compararemos o desempenho do sistema para as três estratégias, quando se varia o desbalanceamento.

5.3.1. Bloqueio Médio Versus Desbalanceamento para a Estratégia 2

Sejam a Figura 5.8 e a Figura 5.9. Vemos que quando o limiar é 7, ou seja, não há

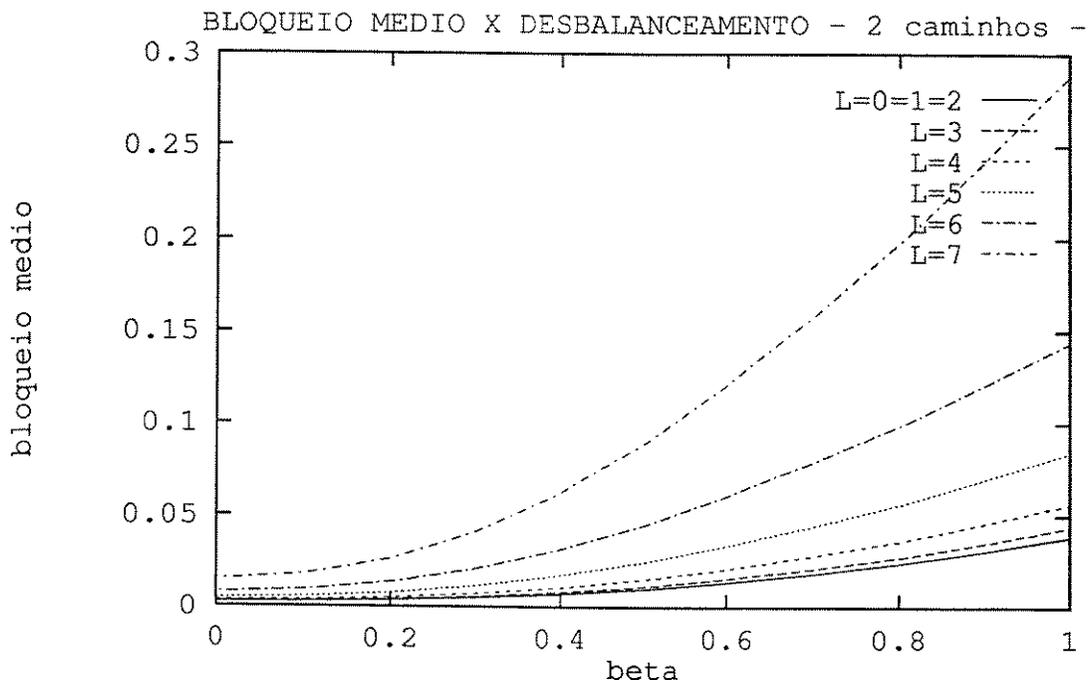


Figura 5.8 - Bloqueio médio versus desbalanceamento global - 2 caminhos.

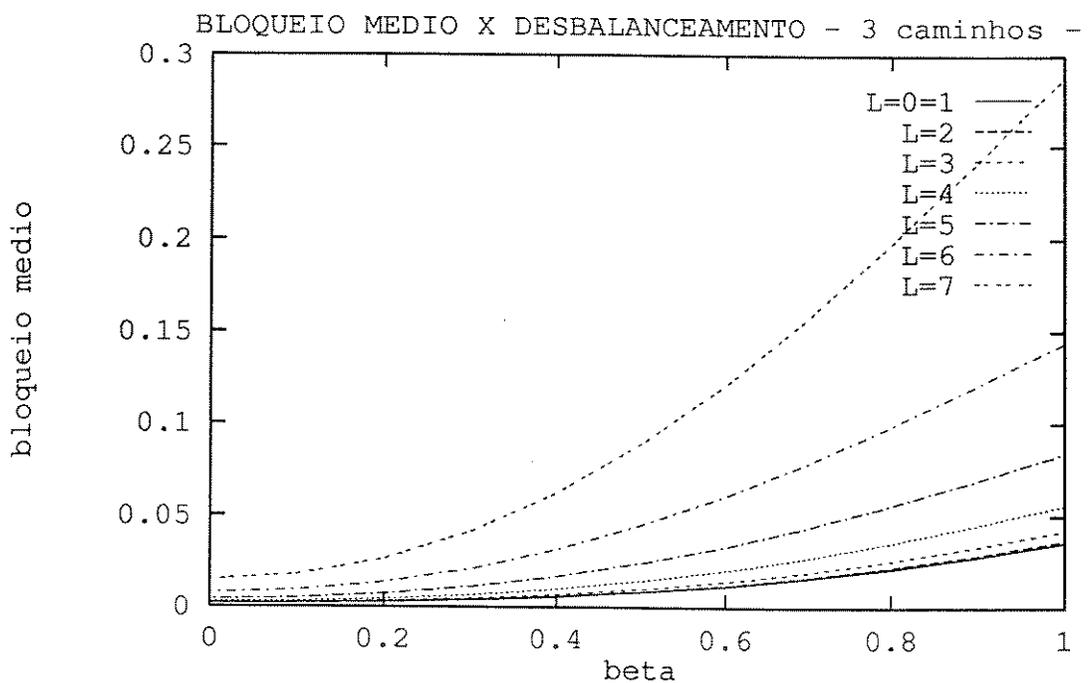


Figura 5.9 - Bloqueio médio versus desbalanceamento global - 3 caminhos.

aplicação das estratégias, o bloqueio médio vai de 1,49% (quando as células estão balanceadas) a 28,77% (quando o desbalanceamento é máximo). Com a aplicação da estratégia o desempenho do sistema melhora substancialmente sendo que mesmo quando temos $\beta = 1$ podemos obter um valor de bloqueio médio inferior a 5% para limiares de bloqueio inferiores a 4.

Nessas condições de sistema ($N = 6$, tráfego total = 6,33 erl. e $\gamma = 0,5$) o bloqueio médio pouco varia para limiares inferiores a 5.

5.3.2. Introdução do Terceiro Caminho no Tráfego Flexível

Seja a Figura 5.10. Concluimos que quanto menor o limiar, maior o ganho no desempenho do sistema com a introdução do terceiro caminho. Para essas condições do sistema ($N = 6$, tráfego total 6,33 erl. e $\gamma = 0,5$) não houve uma melhora substancial de desempenho com a introdução do terceiro caminho, pois, mesmo para limiar 0 e $\beta = 1$ o bloqueio médio passa de 3,86% (para o tráfego flexível com apenas 2 caminhos) para 3,56% (para o tráfego flexível com 2 e 3 caminhos).

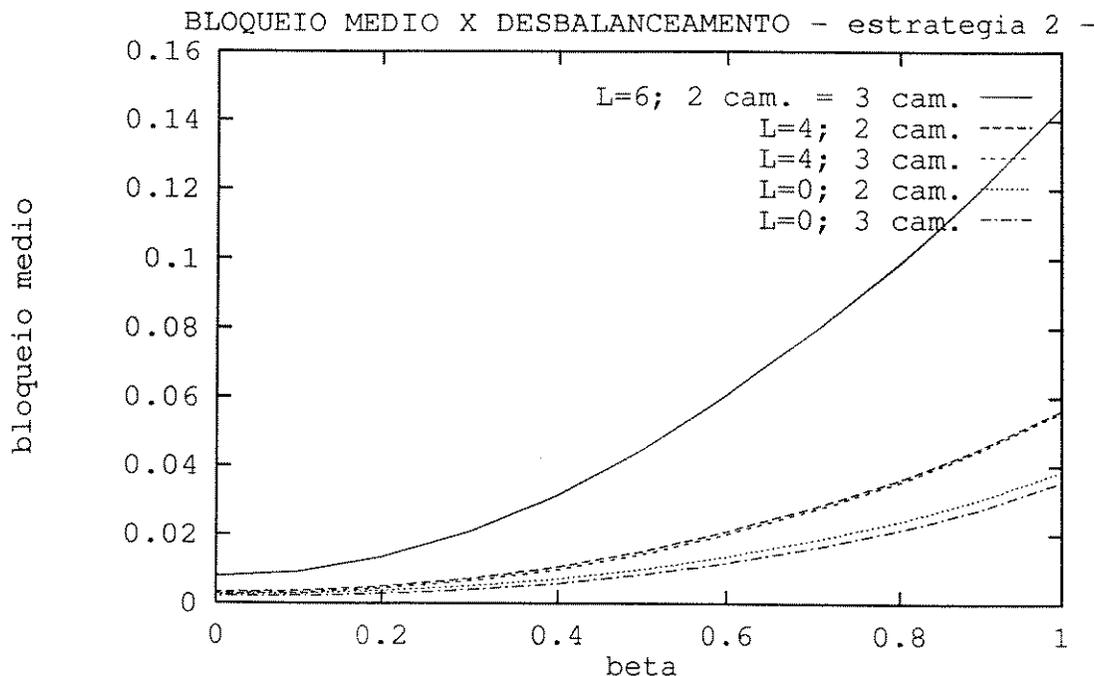


Figura 5.10 - Bloqueio médio versus desbalanceamento global - Estratégia 2.

5.3.3. Comparação entre as Três Estratégias

Sejam a Figura 5.11 e a Figura 5.12. Podemos concluir que quanto menor o limiar

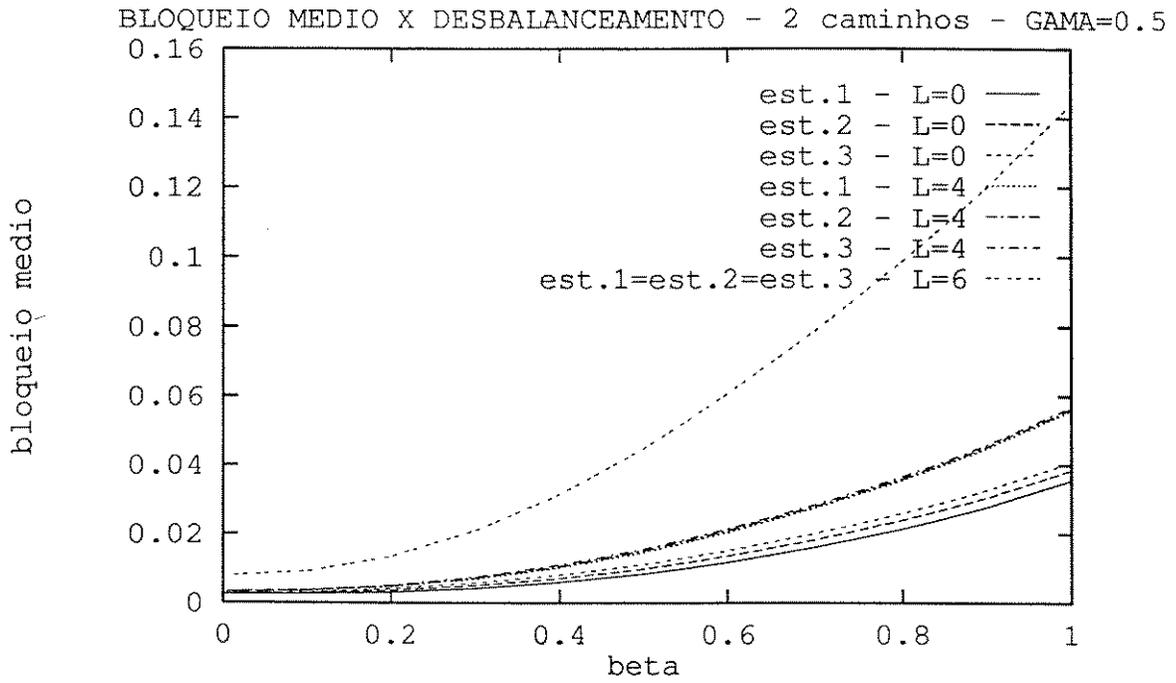


Figura 5.11 - Bloqueio médio versus desbalanceamento global - 2 caminhos - $\gamma = 0,5$.

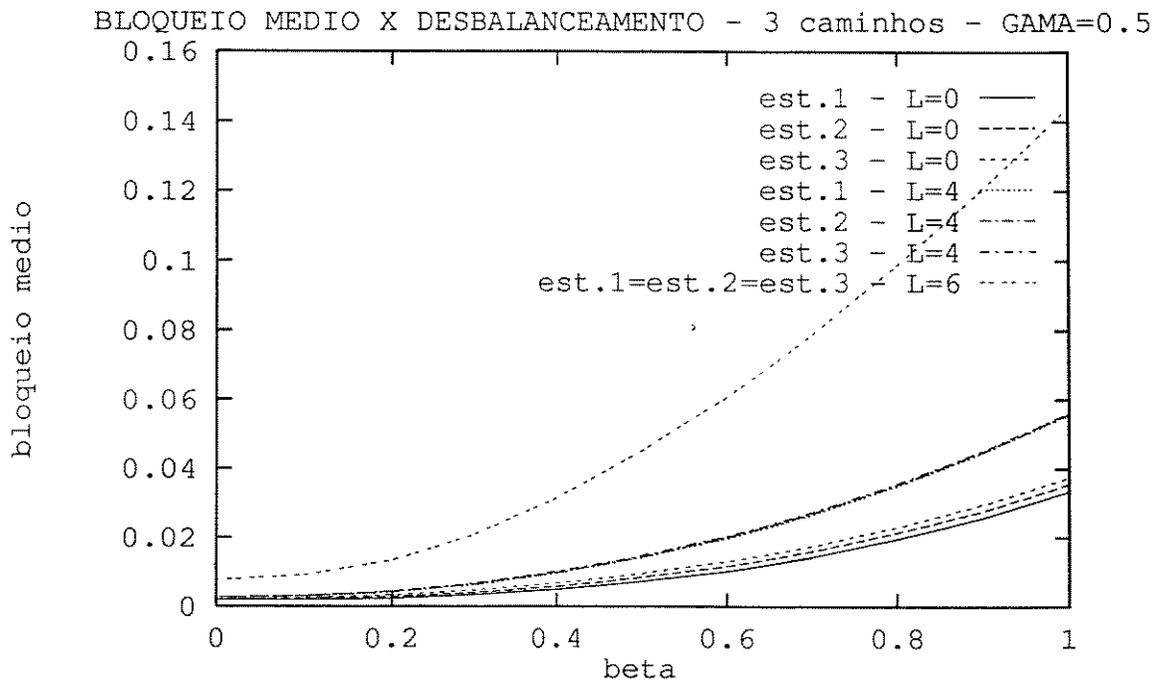


Figura 5.12 - Bloqueio médio versus desbalanceamento global - 3 caminhos - $\gamma = 0,5$.

de bloqueio escolhido, maior a diferença de desempenho das estratégias. Para o limiar N , que no nosso caso é 6, as três estratégias têm um mesmo desempenho.

Consideremos o caso onde a diferença entre as estratégias seja mais significativa: limiar 0, $\beta = 1$ e, por exemplo, tráfego flexível com apenas dois caminhos: a estratégia 1 apresenta um bloqueio médio igual a 3,57%; a estratégia 2 igual a 3,86% e a estratégia 3 igual a 4,09%. Podemos concluir que para esse sistema ($N = 6$, tráfego total 6,33 erl.) não há uma diferença significativa de desempenho entre as três estratégias propostas.

5.4. BLOQUEIO MÉDIO VERSUS TRÁFEGO

Seja um sistema celular com 6 canais por célula e uma flexibilidade igual a 0,5.

Analisaremos primeiramente o caso do sistema estar balanceado ($\beta_i = 0$, onde $i = 1, 2, 3$). Nesta condição, as três estratégias são coincidentes. Em seguida, consideraremos o caso do sistema desbalanceado, com desbalanceamento global $\beta = 0,5$. Para ambas as condições, estudaremos o desempenho do sistema para a variação do tráfego total do sistema ($6 \leq A \leq 12$ erl).

5.4.1. Sistema Balanceado

Sejam a Figura 5.13 e a Figura 5.14. O desempenho do sistema pouco varia para valores de limiar de bloqueio inferiores a 5, mesmo quando o tráfego total é alto (em torno de 12 erl).

O bloqueio médio para o limiar 7 corresponde ao desempenho do sistema quando não se aplica nenhuma estratégia. No caso da Figura 5.13, por exemplo, para um bloqueio médio de 5%, se não aplicarmos nenhuma estratégia, o tráfego total do sistema não deve ultrapassar 8,7 erl. Já, aplicando-se a estratégia, mesmo que o limiar de bloqueio seja 6, para essas mesmas condições, o tráfego total do sistema poderá chegar ao valor de 10,2 erl., ou seja, há um aumento de 17%. Para o limiar 0 o tráfego é de 11,2 erl., correspondendo a um aumento de 29% de capacidade.

Seja a Figura 5.15. Podemos concluir que quanto menor o limiar de bloqueio escolhido e quanto maior o tráfego, maior o ganho que se obtém com a adição do terceiro caminho ao tráfego flexível. Quando temos limiar de bloqueio 0 e tráfego total 12 erl., o bloqueio médio para o tráfego flexível com apenas dois caminhos é de 6,45%, passando

para o valor de 5,68% com a introdução do terceiro caminho no tráfego flexível. Embora haja uma melhora no desempenho do sistema, ela pode não compensar o aumento da complexidade dele.

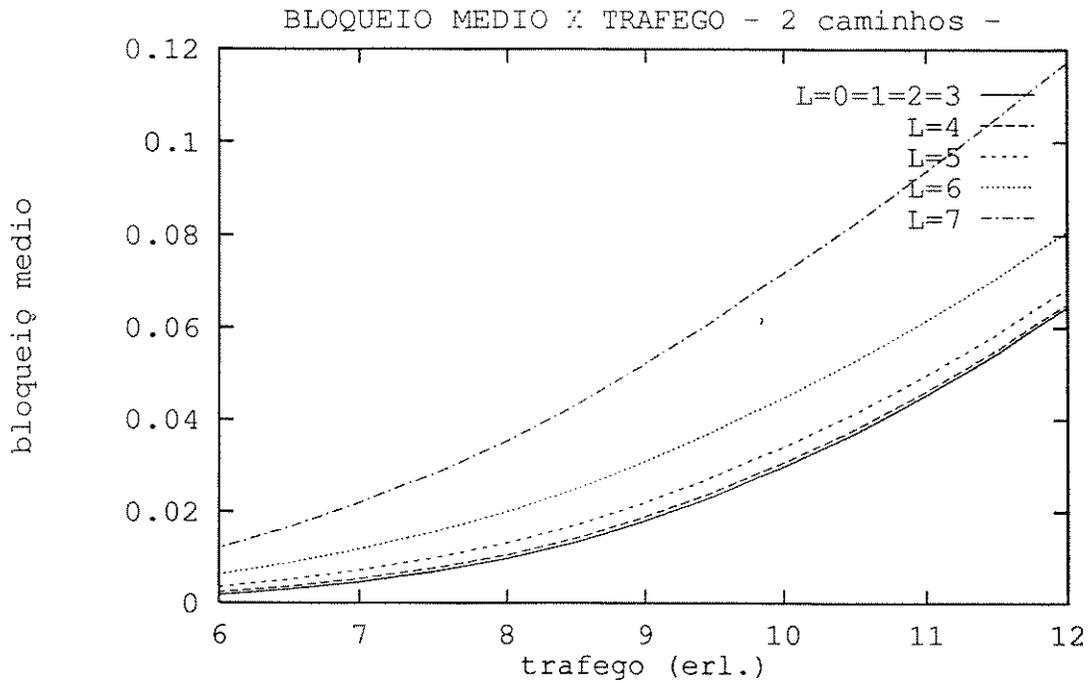


Figura 5.13 - Bloqueio médio versus tráfego - 2 caminhos.

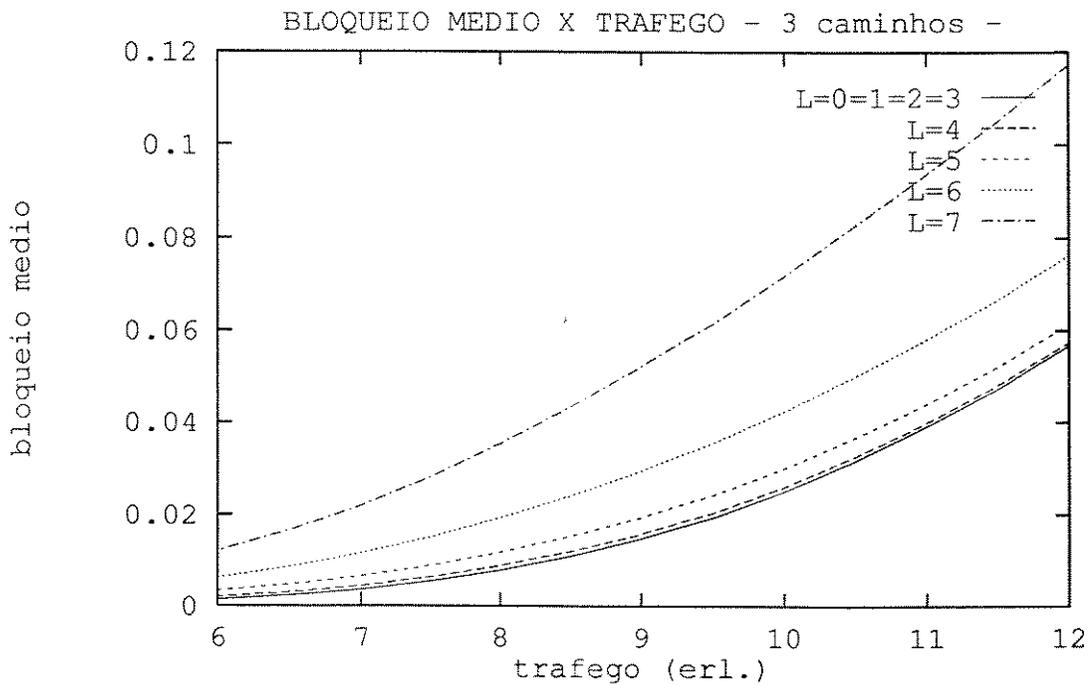


Figura 5.14 - Bloqueio médio versus tráfego - 3 caminhos.

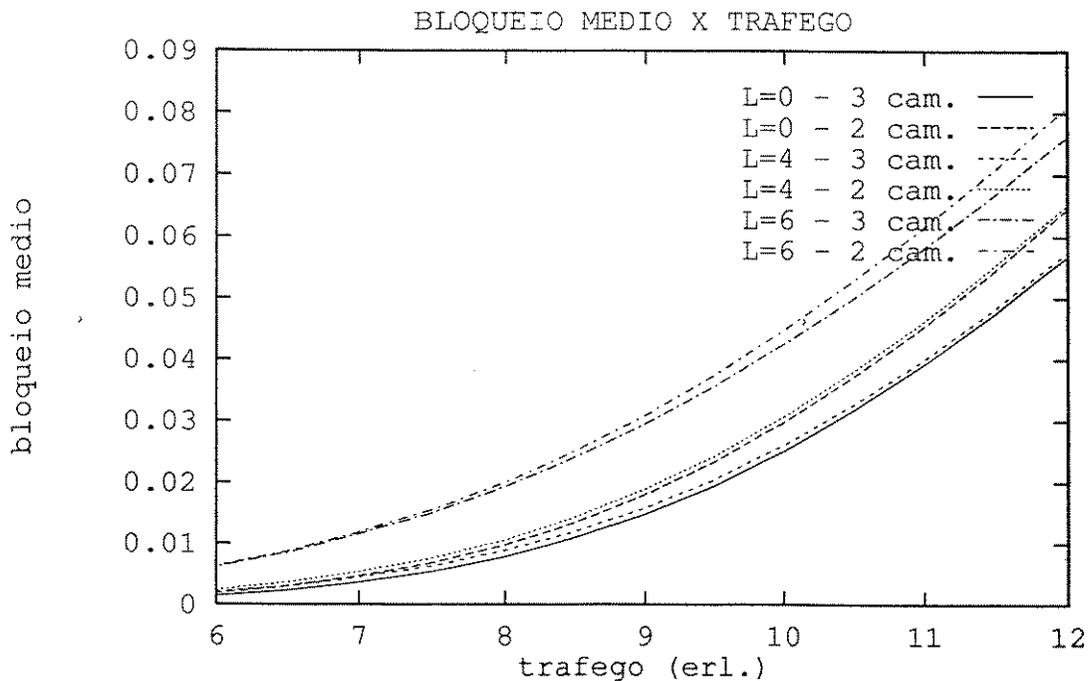


Figura 5.15 - Bloqueio médio versus tráfego.

5.4.2. Sistema Desbalanceado ($\beta = 0,5$)

Consideraremos nesse item primeiramente o comportamento do desempenho do sistema para os diversos valores de limiar de bloqueio e para uma dada estratégia (seja, por exemplo, a estratégia 2 e a opção de tráfego flexível com 2 e 3 caminhos).

Em seguida, faremos uma comparação do desempenho do sistema para a aplicação das três estratégias propostas. Finalmente, analisaremos a melhora do desempenho do sistema com a introdução do terceiro caminho no tráfego flexível.

Seja a Figura 5.16. Podemos concluir, de forma análoga ao sistema balanceado, que mesmo para um tráfego elevado (12 erl.) não há um ganho expressivo no desempenho do sistema, se se passa do limiar 4 para valores inferiores. Por outro lado, supondo o tráfego do sistema 12 erl., para o limiar 4 temos um bloqueio médio de 8,51%, enquanto que para o limiar 5 o bloqueio médio se eleva para 10,04%, o que representa uma variação de desempenho já considerável.

O limiar 7 corresponde ao desempenho do sistema quando não há aplicação de nenhuma estratégia. Nesse caso, para um tráfego de 12 erl., o bloqueio médio é 26,39%. Quando aplicamos a Estratégia 2 e adotamos o limiar de bloqueio 6, o bloqueio médio cai para 14,49%, o que já demonstra a grande eficiência das estratégias propostas para a melhora do desempenho do sistema.

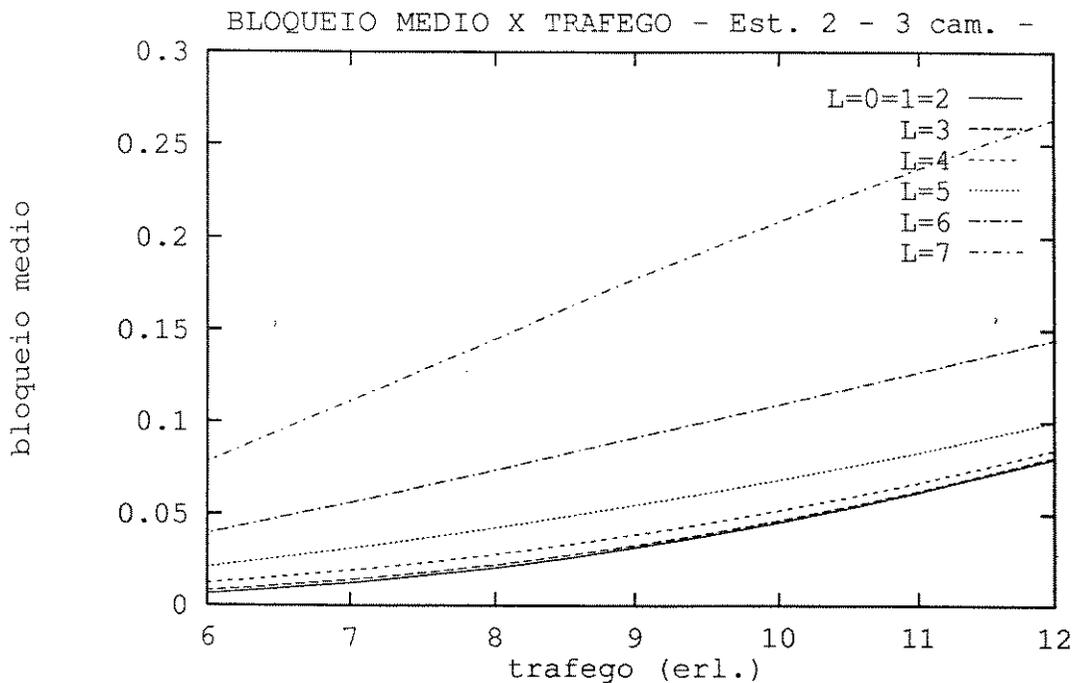


Figura 5.16 - Bloqueio médio versus tráfego - 3 caminhos - Estratégia 2.

Seja um bloqueio médio de 5%. Se não aplicarmos nenhuma estratégia, o tráfego deverá ser no máximo 2,96 erl. Se aplicamos a estratégia 2 (e o tráfego flexível com 2 e 3 caminhos) e consideramos o limiar 6, o tráfego deverá ser no máximo 6,7 erl., o que representa um aumento de 126% de capacidade. Se consideramos o limiar 0, o tráfego deverá ser no máximo 10,2 erl., o que representa um aumento de 245% da capacidade.

Sejam a Figura 5.17, a Figura 5.18, a Figura 5.19 e a Figura 5.20. Podemos concluir que quanto menor o limiar, maior a diferença de desempenho das três estratégias. Para um limiar igual ou inferior a 4 e para um tráfego igual ou superior a 8 erl. notamos uma diferença razoável no desempenho das três estratégias.

Para um tráfego igual ou superior a 8 erl. percebe-se uma melhora sensível no desempenho do sistema com a introdução do terceiro caminho no tráfego flexível, principalmente se se consideram limiares de bloqueio iguais ou inferiores a 4. Quanto menor o limiar de bloqueio, maior o ganho no desempenho do sistema com a introdução do terceiro caminho no tráfego flexível.

Seja um bloqueio médio de 5%. Se não aplicarmos nenhuma estratégia, o tráfego deverá ser no máximo 2,96 erl.

Supondo que o limiar seja 6, o tráfego deverá ser no máximo 6,7 erl., seja qual for a estratégia e seja qual for a opção para o tráfego flexível (2 caminhos ou 2 e 3 caminhos). Isso representa um ganho de tráfego de 126%.

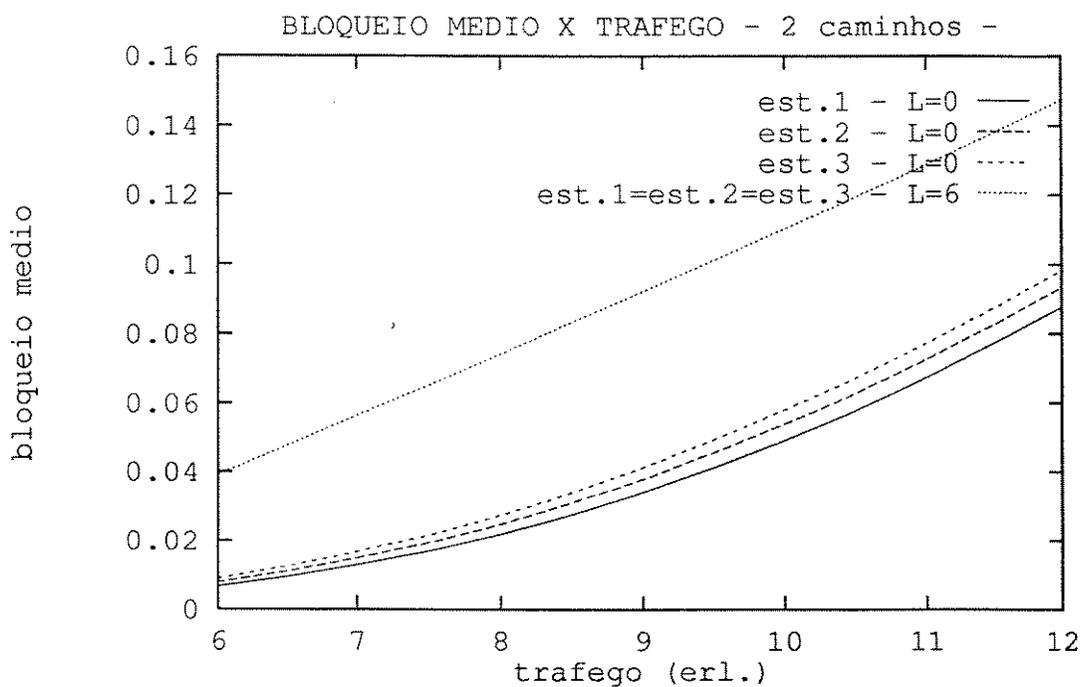


Figura 5.17 - Bloqueio médio versus tráfego - 2 caminhos.

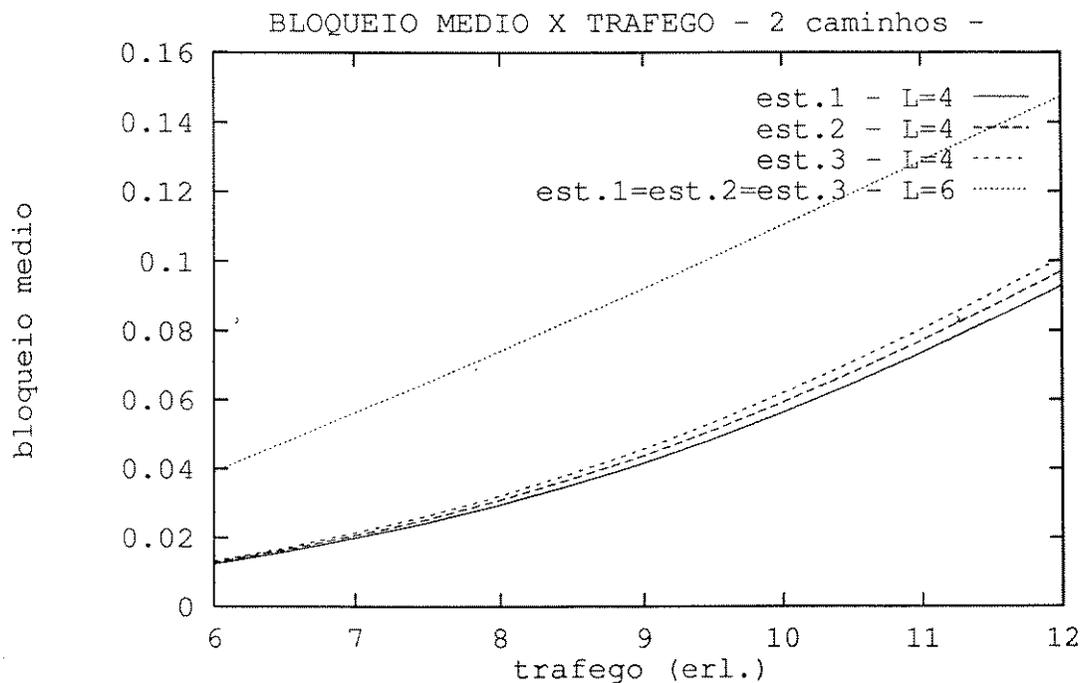


Figura 5.18 - Bloqueio médio versus tráfego - 2 caminhos.

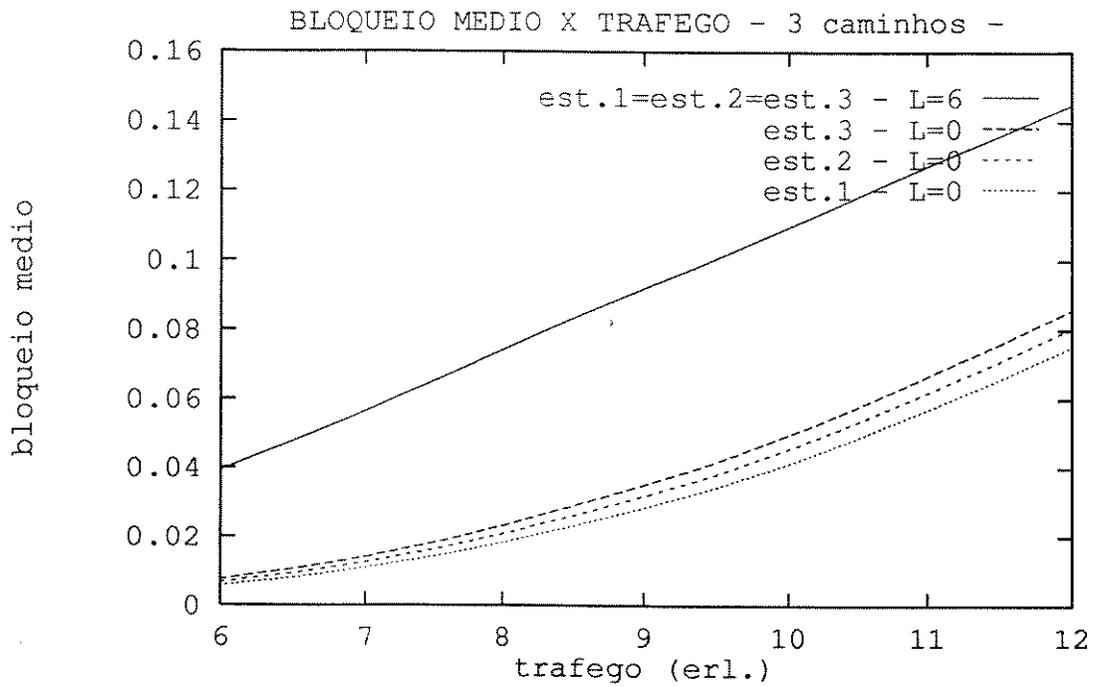


Figura 5.19 - Bloqueio médio versus tráfego - 3 caminhos.

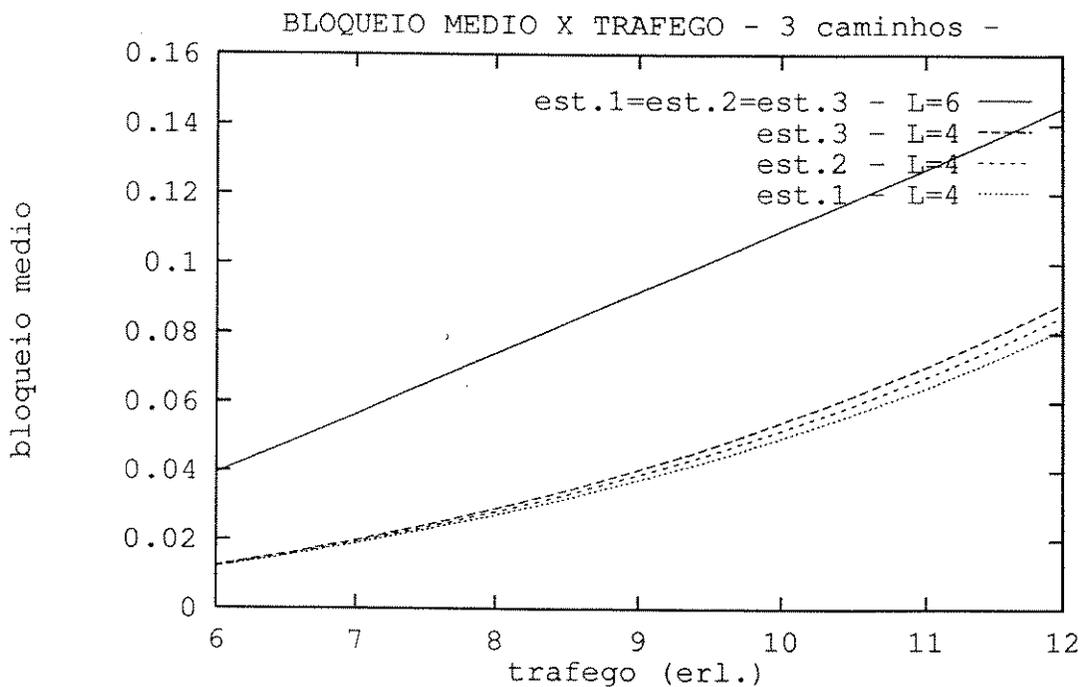


Figura 5.20 - Bloqueio médio versus tráfego - 3 caminhos.

Supondo que o limiar seja 0, teremos:

- para a estratégia 1, tráfego flexível com 2 caminhos: o tráfego deverá ser no máximo 10 erl., o que representa um ganho de tráfego de 238%;
- para a estratégia 1, tráfego flexível com 2 e 3 caminhos: o tráfego deverá ser no máximo 10,6 erl., o que representa um ganho de tráfego de 258%;
- para a estratégia 2, tráfego flexível com 2 caminhos: o tráfego deverá ser no máximo 9,7 erl., o que representa um ganho de tráfego de 228%;
- para a estratégia 2, tráfego flexível com 2 e 3 caminhos: o tráfego deverá ser no máximo 10,2 erl., o que representa um ganho de tráfego de 246%;
- para a estratégia 3, tráfego flexível com 2 caminhos: o tráfego deverá ser no máximo 9,5 erl., o que representa um ganho de tráfego de 221%;
- para a estratégia 3, tráfego flexível com 2 e 3 caminhos: o tráfego deverá ser no máximo 10,0 erl., o que representa um ganho de tráfego de 238%;

5.5. CONCLUSÃO

Podemos concluir esse capítulo tecendo as seguintes considerações:

- Como seria de se esperar, a estratégia 1 é a que apresenta melhor desempenho, seguida da estratégia 2 e, finalmente, da estratégia 3;
- Quanto maior a proporção de tráfego flexível do sistema, maior a eficácia da técnica de variação do limiar de bloqueio;
- Verificou-se um aumento substancial da capacidade de tráfego do sistema com a aplicação das estratégias propostas. No que se refere ao limiar de bloqueio, como era de se esperar, o melhor desempenho do sistema ocorre quando $L = 0$ mas o maior ganho de desempenho ocorre quando se passa de $L = N + 1$ para $L = N$; o segundo maior ganho quando se passa de $L = N$ para $L = N - 1$, e assim sucessivamente, até $L = 0$;
- Quanto menor o limiar de bloqueio, mais expressiva a diferença de desempenho entre as três estratégias e maior a contribuição da adição do terceiro caminho ao tráfego flexível.
- Pode existir um valor para o limiar de bloqueio (no caso do sistema de telefonia celular apresentado nesse trabalho esse valor é 4) abaixo do qual o desempenho do sistema

pouco ou nada varia. Então é desnecessário implementar um sistema com limiar de bloqueio 0. O interessante é o estudo, para cada sistema a ser implementado, do valor de limiar de bloqueio mais adequado para se atender ao valor desejado de bloqueio médio.

- Quanto maior o tráfego, maior o ganho com a adição do terceiro caminho ao tráfego flexível e maior a diferença entre as três estratégias. No sistema estudado, só é significativo o ganho no desempenho do sistema com a introdução do terceiro caminho se tivermos limiar igual ou inferior a 4 e tráfego igual ou superior a 8 erl. De forma análoga, só é compensador levar em conta as estratégias se tivermos um limiar igual ou inferior a 4 e um tráfego igual ou superior a 8 erl.
- Nas situações de baixo e pequeno desbalanceamento, pode-se implementar a estratégia que for mais simples, com o tráfego flexível tendo apenas dois caminhos, pois os resultados serão já bastante satisfatórios.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

O objetivo do rádio móvel celular é proporcionar ao assinante, que já está habituado à qualidade da rede telefônica fixa, a flexibilidade. De acordo com as especificações mais aceitas, a probabilidade de um assinante ter a sua ligação bloqueada (Probabilidade de Bloqueio) durante a hora de maior movimento deveria ser mantida abaixo dos 2%. Na verdade, o valor 5% é aceitável, mas há sistemas trabalhando com 10% ou mais.

Tendo em vista uma alocação mais eficiente dos canais em cada célula para um melhor desempenho de tráfego, surgiram várias técnicas como alocação dinâmica de canais, alocação híbrida de canais, alocação de canais por empréstimo, etc.

A literatura que trata das técnicas de encaminhamento alternativo é de fato bastante escassa e já foi citada ao longo da tese. Por outro lado o assunto referente a algoritmos de alocação de canais é extenso e tem sido razoavelmente explorado. A título de consulta o leitor poderá se utilizar das Referências [11 a 17].

A técnica que desenvolvemos nesta tese, chamada de encaminhamento alternativo do tráfego flexível, consiste em tirar proveito do fato de que se um móvel está próximo da fronteira de uma célula, ele poderá ter uma comunicação adequada com mais de uma estação base. Podemos usar esse fato para encaminhar sua ligação para a célula menos sobrecarregada (com menos canais ocupados, por exemplo).

Podemos citar duas vantagens do encaminhamento alternativo através do tráfego flexível em relação às outras técnicas citadas anteriormente:

- 1) As técnicas anteriores reclamam a utilização de uma unidade de controle de processamento central, onde cada chamada é tratada desde o início até o final. Já as técnicas que utilizam as áreas de sobreposição de 2 ou 3 células adjacentes para o encaminhamento alternativo podem ser tratadas de maneira descentralizada, dentro da MSC local.

2) Estamos usando um recurso já disponível no sistema pois para que o "hand-off" seja efetuado, já existem essas áreas de sobreposição. É necessária uma certa flexibilidade do sistema para que as chamadas dos móveis que atravessam o limite entre 2 células não sejam interrompidas, caso não haja disponibilidade imediata de canais na célula de ingresso. De fato, estudos rigorosos [8] mostram que 40% do tráfego total de uma célula pode ser considerado como disponível para encaminhamento alternativo.

A idéia da técnica proposta é baseada numa já existente "Directed Retry" [9] ou ARB [8] onde o tráfego flexível de uma dada célula é enviado para outra apenas na condição em que sua própria célula esteja bloqueada. Na nova técnica proposta a idéia é não esperar que a célula entre no estado de bloqueio para só depois haver encaminhamento alternativo. Ao invés disso, define-se um limiar de bloqueio menor ou igual à capacidade máxima de canais da célula, a partir do qual o encaminhamento poderá ocorrer. Seja N o número de canais por célula e L o limiar de bloqueio estabelecido; se $L = N + 1$ significa que em nenhum instante vai ocorrer o desvio de tráfego flexível para outra célula já que a célula jamais alcançará o estado em que $N + 1$ canais estão bloqueados. Para $L = N$ a estratégia proposta coincide com a "Directed Retry" (ou ARB) e para $0 \leq L < N$ melhores resultados foram obtidos.

Em 1991 Mencia [7] estudou o desempenho do tráfego de um sistema de rádio móvel celular constituído de duas células contíguas, que utilizava a Variação do Limiar de Bloqueio como algoritmo de encaminhamento do tráfego flexível. Em seu trabalho, Mencia [7] mostra que o ganho de tráfego com a utilização da técnica proposta é, de fato, substancial. Por outro lado, Yacoub [8] demonstra que uma considerável proporção de assinantes com acesso a duas células também pode se comunicar adequadamente com uma terceira célula.

É, portanto, plausível estender o estudo de Mencia para um sistema de três células mutuamente adjacentes, onde se tratam tanto o tráfego flexível com dois caminhos de rádio (com acesso a apenas duas células) quanto o tráfego flexível com três caminhos de rádio (com acesso a três células).

Nesta tese foram consideradas as duas opções para o tráfego flexível: tráfego flexível com apenas dois caminhos ou tráfego flexível com dois e três caminhos. Verificou-se se a melhora do desempenho do sistema com a introdução do terceiro caminho compensa a complexidade de implementação associada.

No caso em que as células envolvidas com o escoamento do tráfego flexível apresentaram o mesmo número de canais ocupados, foram propostas três estratégias:

Estratégia 1 - Consiste em enviar o tráfego flexível (com dois ou três caminhos) para a célula menos desbalanceada;

Estratégia 2 - Não leva em consideração o desbalanceamento das células, repartindo o tráfego flexível igualmente entre as células em questão;

Estratégia 3 - O tráfego flexível permanece na célula de primeira opção, mantendo o desbalanceamento do sistema.

Note-se que as três estratégias diferirão entre si apenas no caso em que o sistema estiver desbalanceado. Caso contrário, serão coincidentes.

Foram definidos os parâmetros de entrada do sistema, que são: número de canais por célula N , limiar de bloqueio L , tráfego total do sistema A , flexibilidade do sistema γ , desbalanceamento de tráfego da célula i ($i = 1, 2, 3$) β_i e a opção O de se considerar tráfego flexível com apenas dois caminhos ou tráfego flexível com dois e três caminhos de rádio.

Foram definidos também os parâmetros de saída que seriam utilizados para a avaliação do desempenho do sistema, que são as probabilidades de bloqueio de cada célula e a probabilidade de bloqueio média do sistema.

A partir da flexibilidade γ calculou-se a flexibilidade parcial δ e a partir de β_i ($i = 1, 2, 3$) calculou-se o desbalanceamento global do sistema β . A introdução do parâmetro β tem por objetivo a redução do número de parâmetros do sistema, para que se possam visualizar melhor os resultados computacionais obtidos, relativamente às várias distribuições de tráfego do sistema.

A avaliação do desempenho do sistema foi feita através do cálculo do bloqueio médio do sistema. Para o seu cálculo, foi necessário se ter os diversos fluxos de tráfego do sistema (Capítulo 3) e as probabilidades de bloqueio das células (Capítulo 4).

Para o cálculo das probabilidades de bloqueio utilizou-se como ferramenta a cadeia de Markov, especificamente os Processos de Nascimento e Morte tridimensional aplicados a três células.

Finalmente os resultados, mostrados através de gráficos, foram obtidos por programa computacional que implementa de maneira rigorosa as três estratégias propostas.

As principais conclusões obtidas foram:

- Como seria de se esperar, a estratégia 1 é a que apresenta melhor desempenho, seguida da estratégia 2 e, finalmente, da estratégia 3;

- Quanto maior **a** proporção de tráfego flexível do sistema, maior a eficácia da técnica de variação do **limiar** de bloqueio;
- Verificou-se **um** aumento substancial da capacidade de tráfego do sistema com a aplicação das **estratégias** propostas. No que se refere ao limiar de bloqueio, como era de se esperar, o **melhor** desempenho do sistema ocorre quando $L = 0$ mas o maior ganho de desempenho **ocorre** quando se passa de $L = N + 1$ para $L = N$; o segundo maior ganho quando se passa **de** $L = N$ para $L = N - 1$, e assim sucessivamente, até $L = 0$;
- Quanto menor **o** limiar de bloqueio, mais expressiva a diferença de desempenho entre as três estratégias **e** maior a contribuição da adição do terceiro caminho ao tráfego flexível.
- Pode existir **um** valor para o limiar de bloqueio (no caso do sistema de telefonia celular apresentado **nesse** trabalho esse valor é 4) abaixo do qual o desempenho do sistema pouco ou **nada** varia. Então é desnecessário implementar um sistema com limiar de bloqueio 0. **O** interessante é o estudo, para cada sistema a ser implementado, do valor de limiar de **bloqueio** mais adequado para se atender ao valor desejado de bloqueio médio.
- Quanto maior **o** tráfego, maior o ganho com a adição do terceiro caminho ao tráfego flexível e maior **a** diferença entre as três estratégias. No sistema estudado, só é significativo o ganho **no** desempenho do sistema com a introdução do terceiro caminho se tivermos limiar **igual** ou inferior a 4 e tráfego igual ou superior a 8 erl. De forma análoga, só é **compensador** levar em conta as estratégias se tivermos um limiar igual ou inferior a 4 e um tráfego **igual** ou superior a 8 erl.
- Nas situações **de** baixo e pequeno desbalanceamento, pode-se implementar a estratégia que for mais **simples**, com o tráfego flexível tendo apenas dois caminhos, pois os resultados serão já **bastante** satisfatórios.

Outras **conclusões** a que chegamos são mencionadas a seguir:

- *Tendência a balancear o tráfego* - Em sistemas que não utilizam encaminhamento alternativo pode-se **dar** o caso de uma célula ter todos os seus canais ocupados, enquanto outra tem todos **os** seus canais livres. Na nossa proposta esta possibilidade é minimizada, pelo fato das **células** sempre tenderem a enviar o tráfego flexível para a célula menos sobrecarregada, **e**, considerando que este representa 40% do tráfego total ou mais, as chances de **desbalanceamento** diminuem;

- *Melhor aproveitamento do tráfego fixo* - em sistemas sem encaminhamento do tráfego flexível, quando **uma** célula tiver todos os seus canais ocupados e uma nova chamada considerada fixa **aparecer** no sistema ou na célula, esta será bloqueada. No nosso caso esta probabilidade **é** reduzida, pois a partir do limiar escolhido a célula tende a escoar unicamente seu **tráfego** fixo, não tendo que competir com o tráfego flexível.

No nosso **trabalho** escolhemos fazer o estudo através da Cadeia de Markov ao invés de uma simulação **de** um sistema real. Uma proposta para trabalho futuro seria a de simular um sistema de **grande** porte através do uso de linguagem apropriada (SIMULA, SIMSCRIP, etc.) **onde** se levaria em conta hand-off, células com diferente número de canais disponíveis, células **de** tamanho variável, etc. Além disso, alguma estratégia de rearranjo de chamadas poderia **ser** explorada para melhorar o desempenho do sistema. No rearranjo uma chamada em curso **e** com acesso a mais de uma célula poderia ser transferida para outra célula, liberando **canais** para chamadas fixas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D.C. Cox, D.O. Reudimk, "A Comparison of Channel Assignment Strategies in Large-Scale Mobile Communications Systems", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. Com-20, No. 2, April 1972.
- [2] D.C. Cox, D.O. Reudimk, "Increasing Channel Occupancy in Large-Scale Mobile Radio Systems: Dynamic Channel Reassignment", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. Com-21, No. 11, November 1973.
- [3] Antennas Specialists, "Dynamic Frequency Allocations Increases Cellular Efficiency", *Communications Engineering International*, November 1986.
- [4] M.D. Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*, CRC Press, USA, Chap. 3, 1993.
- [5] R. Steele, V.K. Prabru, "High-User-Density Digital Cellular Mobile Radio Systems", *IEEE Proceedings, Part F*, Vol. 132, p. 396, August 1985.
- [6] J.H. Sanchez, "Traffic Performance of Cellular Mobile Radio Systems", Ph.D. Thesis, University of Essex, 1988.
- [7] J.C. Mencia, "Desempenho de um Sistema de Comunicações Móveis com a Variação do Limiar de Bloqueio", Tese de Mestrado, Janeiro 1991.
- [8] M.D. Yacoub, "Mobile Radio with Fuzzy Cell Boundaries", Ph.D. Thesis, University of Essex, England, May 1988.
- [9] B. Eklundh, "Channel Utilization and Blocking Probability in a Cellular Mobile Telephone System with Directed Retry", *11th ITC*, April 1985.
- [10] M.D. Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*, CRC Press, USA, Chap. 12, 1993.

- [11] D. Everitt, "Traffic Capacity of Cellular Mobile Communications Systems", *Comput. Networks ISDN Syst.*, Vol. 20, pp. 447-454, December 1990.
- [12] R.A. Valenzuela, "Dynamic Resource Allocation in Line-of-Sight Microcells", *IEEE J. Selected Areas Commun.*, Vol. 11, No. 6, pp. 941-948, August 1993.
- [13] J.C.-I. Chuang, "Performance Issues and Algorithms for Dynamic Channel Assignment", *IEEE J. Selected Areas Commun.*, Vol. 11, No. 6, pp. 955-963, August 1993.
- [14] D.W. McMillan, "Traffic Analysis for Cellular Mobile Networks", Ph.D. dissertation, The University of Melbourne, Melbourne, Australia 1993.
- [15] K.N. Sivarajan, R.J. McEliece, and J.W. Ketchum, "Dynamic Channel Assignment in Cellular Radio", in *Proc. 40th Vehicular Technology Conf.*, pp. 631-637, 1990.
- [16] S. Tekinay, and B. Jabbari, "Handover and Channel Assignment in Mobile Cellular Networks", *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 29, No. 11, pp. 42-46, 1991.
- [17] J.N. Daigle, and N. Jain, "A Queueing System with Two Arrival Streams and Reserved Servers with Application to Cellular Telephone", in *Proc. INFOCOM'92*, April 1992.