

## 8

### Solução Analítica para Múltiplas Classes de Usuários

A comunicação por voz é a principal aplicação dos primeiros sistemas de comunicações móveis. Com o desenvolvimento da tecnologia e o aumento das taxas de transmissão, a evolução natural da aplicação dos sistemas móveis é a oferta de múltiplos serviços. Além do serviço de voz, transitam na rede móvel mensagens curtas; e-mail; dados; fotos e vídeo. Os usuários são diferentes entre si. Cada serviço possui características próprias, como o tipo de tráfego e os requisitos de qualidade de serviço.

O Controle de Admissão de Chamadas do Sistema de Comunicações Móveis deve lidar com usuários que apresentam características distintas, oferecendo serviços diferenciados para usuários de tarifas diversas e considerando os requisitos de qualidade de serviço de cada tipo de tráfego. É comum a divisão dos usuários da rede em classes para que se possa considerar as diferenças entre os mesmos. Pode haver classes de tarifa ou classes de tipo de tráfego.

Este capítulo apresenta uma solução mais geral para o problema do Controle de Admissão de Chamadas ao analisar usuários de múltiplas classes. A solução é determinada através do desenvolvimento analítico para o cálculo da probabilidade de bloqueio de chamadas novas e da probabilidade de falha de chamadas em *handoff* utilizando cadeias de Markov.

Os recursos da rede móvel são divididos em Unidades de Banda, UB, que serão aqui denominadas, por simplicidade, de canais. Estes canais podem ser implementados por tecnologias diversas como códigos, frequências, *slots* de tempo, ou outros.

Os usuários do sistema são classificados por classes denominadas  $\gamma$  que podem ter parâmetros diferentes, tanto nas suas características de tráfego, quanto no tratamento dado pelo sistema devido aos seus requisitos de QoS.

No capítulo 9 são apresentados os algoritmos de controle de admissão de chamadas propostos nesta tese para sistemas móveis com usuários de múltiplas classes. Os algoritmos propostos são testados no simulador desenvolvido neste trabalho e descrito no capítulo 4. São simulados casos

simples que possuem solução analítica desenvolvida neste capítulo e seus resultados são comparados entre si. Outros casos mais complexos são simulados e seus resultados são comparados a resultados também simulados utilizando número fixo de canais de guarda.

## 8.1

### Introdução ao Modelo para Sistemas com Usuários de Múltiplas Classes

O modelo desenvolvido neste capítulo para o cálculo das Probabilidades de Bloqueio de Novas Chamadas,  $P_{BN}$ , e das Probabilidades de Falha de *Handoff*,  $P_{FH}$ , é inspirado no modelo para sistemas de uma classe de usuários, apresentado no capítulo 3.

A taxa de chegada de novas chamadas se dá segundo um processo de Poisson. O tempo de retenção do recurso é dado pelo mínimo entre a duração da chamada, representada pela distribuição exponencial, e o tempo de permanência do usuário na célula. Neste capítulo, 8, o tempo de retenção é dado pela distribuição exponencial, que possibilita o cálculo analítico das Probabilidades de Bloqueio e de Falha de Chamadas em *Handoff*. No capítulo 9 os algoritmos de Controle de Admissão para mais de uma classe são apresentados e testados com novas distribuições para o tempo de retenção do canal.

Os usuários utilizam um ou mais números inteiros de Unidades de Banda, UB; para acelerar a transmissão de dados. Cada classe, denotada por classe  $\gamma$ , apresenta uma demanda de recursos de  $B_\gamma$  Unidades de Banda.

As taxas de chegada e saída de cada classe  $\gamma$  são denotadas por  $\lambda_\gamma$  e  $\mu_\gamma$ . Sendo que a taxa de chegada é separada entre as taxas de chegada de usuários novos e de usuários em *handoff* da classe  $\gamma$ , denotadas, respectivamente, por  $\lambda_{N\gamma}$  e  $\lambda_{H\gamma}$ .

Os requisitos de qualidade de serviço, QoS, são definidos por valores aceitáveis de percentual de bloqueio de chamadas novas e percentual de falha de chamadas em *handoff*, e são denotados pelo par  $(Q_{BN\gamma}; Q_{FH\gamma})$ .

O sistema de usuários de múltiplas classes pode ser modelado por uma cadeia de Markov de dimensão  $M$ , onde  $M$  é o número de classes de usuários. Cada estado da cadeia é definido pelo número de usuários ativos pertencentes a cada classe do sistema.

Por exemplo, o estado  $(n_1, n_2, \dots, n_M)$ , pertence a uma cadeia que representa um sistema de  $M$  classes. Há  $n_\gamma$  usuários ativos pertencentes à  $\gamma$ -ésima classe,  $\gamma = 1, 2, 3, \dots, M$ . O sistema possui ao todo  $N_c$  recursos que são distribuídos pelos usuários. Em cada estado são utilizados  $BT_{(n_1, n_2, \dots, n_M)}$

canais, que é a Banda total utilizada quando o sistema está neste estado, dada na equação (8-1).

$$BT_{(n_1;n_2;\dots;n_M)} = \sum_{\gamma=1}^M n_\gamma B_\gamma \quad (8-1)$$

A existência, ou não, de cada estado depende da combinação do número de usuários de cada classe e sua respectiva demanda, de tal forma que o total de recursos requisitado pelo estado possa ser atendido pelo total de Unidades de Banda do sistema. A condição de existência do estado está na equação (8-2).

$$BT_{(n_1;n_2;\dots;n_M)} \leq N_c \quad (8-2)$$

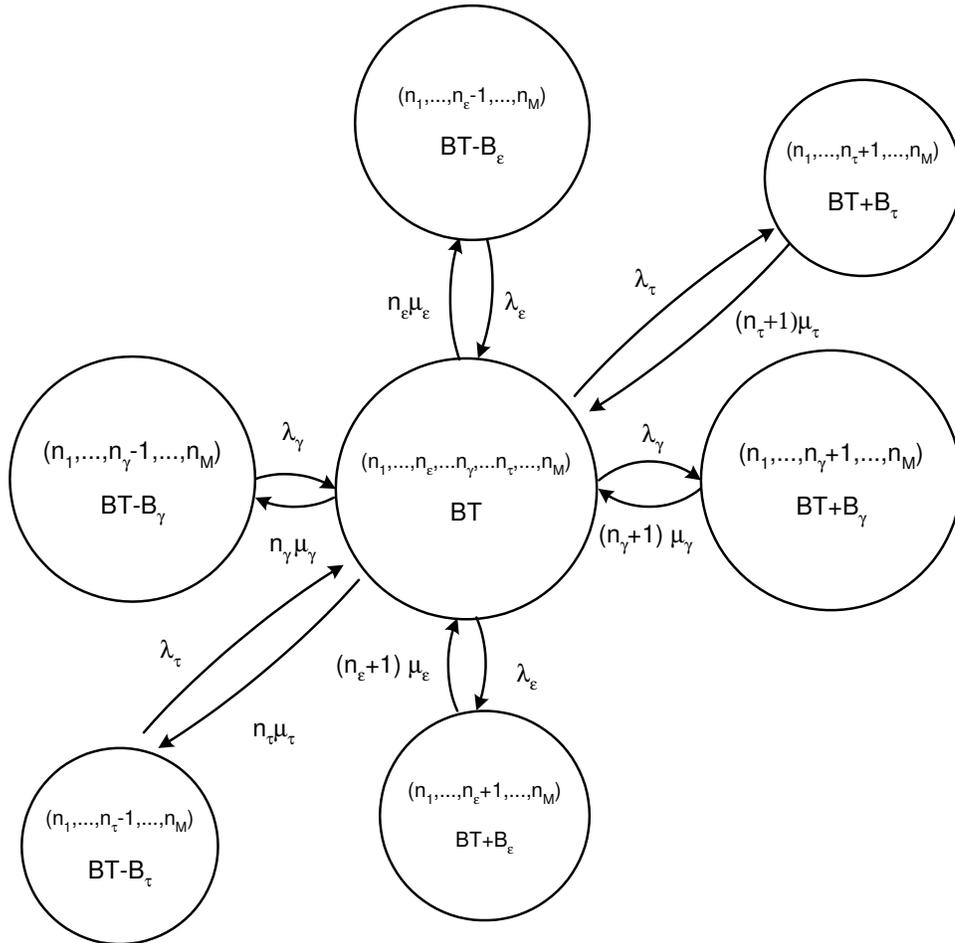


Figura 8.1: Dimensões  $\gamma, \varepsilon$  e  $\tau$  da Cadeia de Markov de dimensão  $M$ , correspondentes às classes  $\gamma, \varepsilon$  e  $\tau$ .

Dado que o sistema está no estado  $(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_\varepsilon, \dots, n_M)$ , a chegada de um usuário da classe  $\gamma$  leva o sistema ao estado  $(n_1, n_2, \dots, n_\gamma + 1, \dots, n_\varepsilon, \dots, n_M)$ , enquanto que a chegada de um usuário da classe  $\varepsilon$  leva o sistema do estado original ao estado  $(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_\varepsilon + 1, \dots, n_M)$ , conforme a figura 8.1. Portanto, conclui-se que há uma dimensão para cada classe de usuários na cadeia de Markov. A chegada (ou saída) de um usuário de uma dada classe determina uma mudança de estado ao longo dessa dimensão. Na figura 8.1 são indicadas três dimensões correspondentes às classes de usuários  $\gamma$ ,  $\varepsilon$ , e  $\tau$ .

Cada classe de usuários possui um número máximo de usuários ativos igual a  $N_\gamma$  dado pelo inteiro obtido da razão entre a quantidade total de recursos e a quantidade de recursos requisitada pelo usuário, equação (8-3).

$$N_\gamma = \left\lfloor \frac{N_c}{B_\gamma} \right\rfloor \quad (8-3)$$

Para uma melhor compreensão do problema, a próxima seção apresenta um exemplo numérico de um sistema de duas classes de usuários.

### 8.1.1

#### Exemplo de Sistema de Duas Classes de Usuários

Seja o sistema com duas classes de usuários que possui um total de 5 unidades de banda,  $N_c = 5UB$ . Os usuários da classe  $A$  ocupam  $1UB$  e da classe  $B$  ocupam  $2UB$ ,  $B_a = 1UB$  e  $B_b = 2UB$ . As taxas de chegada e saída de usuários da classe  $A$  são  $\lambda_1$  e  $\mu_1$  e da classe  $B$  são, respectivamente,  $\lambda_2$  e  $\mu_2$ .

A figura 8.2 representa a cadeia correspondente a este sistema. Em cada estado estão representados os valores do número de usuários ativos de cada classe, denotados pelo par  $(n_a, n_b)$ , e o valor da banda total de cada estado,  $BT_{(n_a, n_b)}$ .

A cadeia de Markov possui dimensão  $M = 2$  com um total de 12 estados. O número máximo de usuários da classe  $A$  é dado por  $N_a$  e da classe  $B$  é dado por  $N_b$ , representados nas equações (8-4) e (8-5), respectivamente.

$$N_a = \left\lfloor \frac{N_c}{B_a} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{5}{1} \right\rfloor = 5 \quad (8-4)$$

$$N_b = \left\lfloor \frac{N_c}{B_b} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{5}{2} \right\rfloor = 2 \quad (8-5)$$

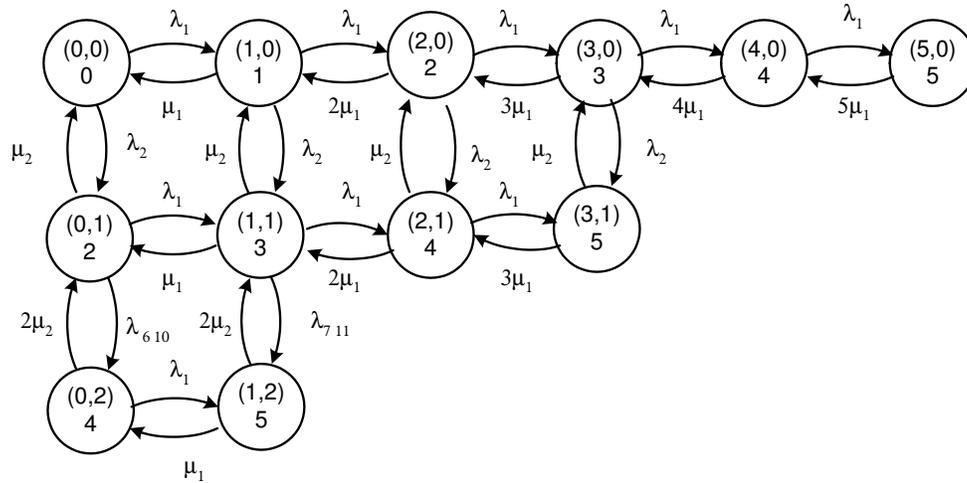


Figura 8.2: Cadeia de Markov de um sistema de duas classes de usuários, dimensão  $M = 2$ , e cinco unidades de banda,  $N_c = 5$ .

A mudança de estados na cadeia na direção horizontal, ou vertical, se dá com a chegada ou conclusão do serviço de usuários da classe  $A$ , ou da classe  $B$ , respectivamente.

**8.2**  
**Modelo para Cálculo da Probabilidade Estacionária dos Estados da Cadeia de Markov de Dimensão  $M$**

No caso genérico de um sistema de  $M$  classes de usuários, a mudança de um estado, para cada um de seus estados vizinhos, depende da chegada, ou conclusão de serviço, de um elemento correspondente a cada uma das  $M$  classes. Portanto, há um máximo de  $2M$  estados conectados a cada estado.

Neste trabalho, definimos como estado central de uma Cadeia de Markov, qualquer estado que esteja rodeado pelo número máximo de estados possíveis,  $2M$ . A figura 8.3 representa um estado central da cadeia de dimensão  $M$  e suas conexões aos  $2M$  estados vizinhos. Equacionando através do princípio do equilíbrio de fluxo de probabilidade em uma superfície envolvendo o estado central, representado na figura 8.3, obtém-se a equação (8-6).

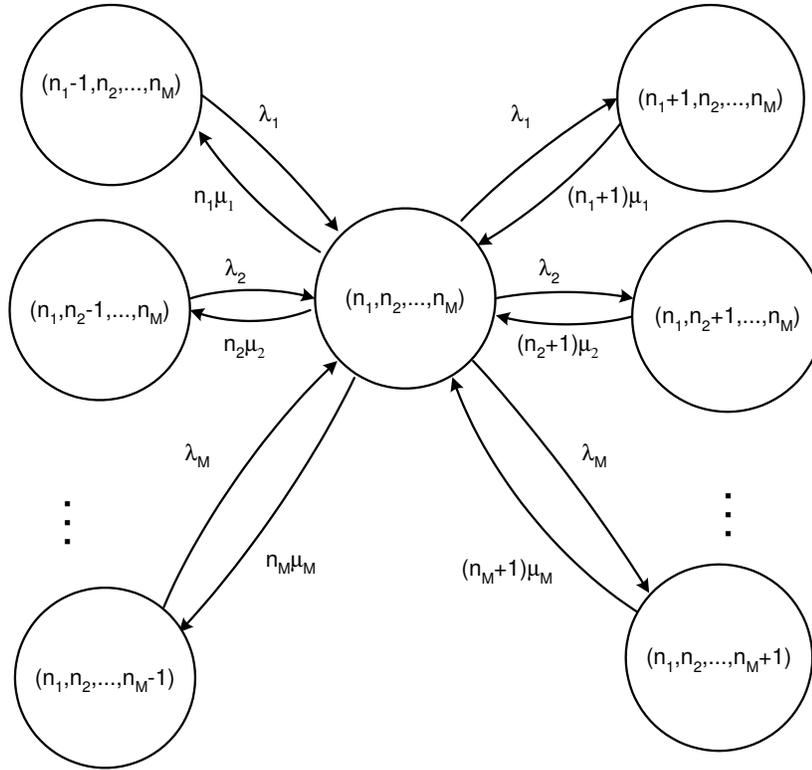


Figura 8.3: Estado Central da Cadeia de Markov de dimensão M.

$$\begin{aligned}
 & P_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} \left[ (\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_M) + \right. \\
 & \quad \left. + (n_1 \mu_1 + n_2 \mu_2 + \dots + n_M \mu_M) \right] = \\
 = & [P_{(n_1+1, n_2, \dots, n_M)}(n_1 + 1)\mu_1 + P_{(n_1, n_2+1, \dots, n_M)}(n_2 + 1)\mu_2 + \dots \\
 & \quad \dots + P_{(n_1, n_2, \dots, n_M+1)}(n_M + 1)\mu_M] + \\
 & + [P_{(n_1-1, n_2, \dots, n_M)}\lambda_1 + P_{(n_1, n_2-1, \dots, n_M)}\lambda_2 + \dots \\
 & \quad \dots + P_{(n_1, n_2, \dots, n_M-1)}\lambda_M] \quad (8-6)
 \end{aligned}$$

Na equação (8-6) considera-se o fluxo chegando e saindo, referente a todos estados ao redor do estado central, denotado pelo número de usuários pertencentes a cada classe  $(n_1, n_2, \dots, n_M)$  e representado na figura 8.3. Como o estado é central, pode-se observar que existem  $2M$  estados ao seu redor, que é o máximo possível. Para estados mais próximos das extremidades da cadeia os estados ao redor podem não existir e há um número menor que  $2M$  estados vizinhos.

Considerando um estado qualquer, deve-se atentar para o fato de

que os  $2M$  estados vizinhos podem existir, ou não, conforme a condição de existência dada pela equação (8-2). Sendo assim, na equação (8-6), cada termo correspondente a um dado estado  $(n_1, n_2, \dots, n_M)$  deve ser multiplicado pelo respectivo fator de existência do estado,  $\alpha_{(n_1, n_2, \dots, n_M)}$ , que pode assumir os valores 0, estado não existe, ou 1, estado existe. Incluindo os fatores de existência na equação (8-6) obtém-se (8-7).

$$\begin{aligned}
P_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} & \left[ \alpha_{(n_1+1, n_2, \dots, n_M)} \lambda_1 + \alpha_{(n_1, n_2+1, \dots, n_M)} \lambda_2 + \dots \right. \\
& \quad \dots + \alpha_{(n_1, n_2, \dots, n_M+1)} \lambda_M + \\
& \quad + \alpha_{(n_1-1, n_2, \dots, n_M)} n_1 \mu_1 + \alpha_{(n_1, n_2-1, \dots, n_M)} n_2 \mu_2 + \dots \\
& \quad \left. \dots + \alpha_{(n_1, n_2, \dots, n_M-1)} n_M \mu_M \right] = \\
& = \left[ \alpha_{(n_1+1, n_2, \dots, n_M)} P_{(n_1+1, n_2, \dots, n_M)} (n_1 + 1) \mu_1 + \right. \\
& \quad + \alpha_{(n_1, n_2+1, \dots, n_M)} P_{(n_1, n_2+1, \dots, n_M)} (n_2 + 1) \mu_2 + \dots \\
& \quad \left. \dots + \alpha_{(n_1, n_2, \dots, n_M+1)} P_{(n_1, n_2, \dots, n_M+1)} (n_M + 1) \mu_M \right] + \\
& \quad + \left[ \alpha_{(n_1-1, n_2, \dots, n_M)} P_{(n_1-1, n_2, \dots, n_M)} \lambda_1 + \right. \\
& \quad + \alpha_{(n_1, n_2-1, \dots, n_M)} P_{(n_1, n_2-1, \dots, n_M)} \lambda_2 + \dots \\
& \quad \left. \dots + \alpha_{(n_1, n_2, \dots, n_M-1)} P_{(n_1, n_2, \dots, n_M-1)} \lambda_M \right] \quad (8-7)
\end{aligned}$$

Cada estado da cadeia dá origem a uma equação de equilíbrio de fluxo (8-7). Dentre os  $(N_1 + 1)(N_2 + 1) \dots (N_M + 1)$  estados iniciais são eliminados os estados que não existem, definidos por (8-2). Restam  $K$  equações correspondentes a  $K$  estados possíveis. Dessas  $K$  equações deve-se escolher  $K - 1$  equações que, associadas a equação (8-8), formam um sistema de  $K$  equações e  $K$  incógnitas cuja solução é a probabilidade estacionária de todos estados da cadeia,  $P_{(n_1, n_2, \dots, n_M)}$ .

$$\sum_{n_1=0}^{N_1} \sum_{n_2=0}^{N_2} \dots \sum_{n_M=0}^{N_M} P_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} \alpha_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} = 1 \quad (8-8)$$

### 8.2.1

#### Algoritmo para o Cálculo da Probabilidade Estacionária

Para resolver um caso geral, com  $M$  classes de usuários, adota-se o seguinte algoritmo.

*Passo 1:* Definição dos parâmetros de entrada:

$N_c$  é a capacidade total do sistema, número total de unidades de banda, UB, que o sistema possui;

$B_\gamma$  é a demanda de banda, em UBs, de um usuário da classe  $\gamma$ ;

$\lambda_\gamma$  é a taxa de chegada de usuários da classe  $\gamma$ ; e

$\mu_\gamma$  é a taxa de serviço de usuários da classe  $\gamma$ .

*Passo 2:* Determinação do número máximo de usuários de cada classe.

$$N_\gamma = \left\lfloor \frac{N_c}{B_\gamma} \right\rfloor \quad (8-9)$$

*Passo 3:* Definição dos estados existentes na cadeia, de acordo com os valores de  $N_1, N_2, \dots, N_M$ . Obtém-se uma cadeia de Markov M-dimensional com número máximo de estados igual a  $(N_1 + 1)(N_2 + 1) \dots (N_M + 1)$ . Cada estado,  $(n_1, n_2, \dots, n_M)$ , requer uma quantidade de recursos  $BT_{(n_1, n_2, \dots, n_M)}$  definida em (8-10), onde  $n_\gamma$  é o número de usuários ativos da classe  $\gamma$ .

$$BT_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} = n_1 B_1 + n_2 B_2 + \dots + n_M B_M \quad (8-10)$$

*Passo 4:* Verificação da existência dos estados através da aplicação da equação (8-2) para cada estado definido no passo 3.

$$BT_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} \leq N_c \Leftrightarrow \alpha_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} = 1 \quad (8-11)$$

$$BT_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} > N_c \Leftrightarrow \alpha_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} = 0 \quad (8-12)$$

*Passo 5:* Cálculo das taxas de chegada e de saída de cada um dos estados. As restrições impostas pelo controle de acesso, através da reserva de recursos, juntamente com as taxas de chegada de usuários formam a taxa de chegada a cada estado.

*Passo 6:* Cada estado dá origem a uma equação de equilíbrio de fluxo (8-6). Eliminados os estados que não existem definidos em (8-12), restam  $K$  equações correspondentes a  $K$  estados possíveis.

*Passo 7:* Escolha de  $K - 1$  equações, que associadas a equação (8-8) formam um sistema de  $K$  equações e  $K$  incógnitas.

*Passo 8:* Solução do sistema de  $K$  equações e  $K$  incógnitas. As incógnitas são as probabilidades estacionárias de cada estado  $P_{(n_1, n_2, \dots, n_M)}$ .

### 8.3

#### Probabilidade de Bloqueio de Chamadas Novas e de Falhas de Chamadas em Handoff para Sistemas de M Classes

A probabilidade de bloqueio de chamadas novas da classe  $\gamma$ ,  $P_{BN\gamma}$ , é a soma das probabilidades estacionárias,  $P_{(n_1, n_2, \dots, n_M)}$ , de todos estados que não são capazes de aceitar mais um usuário novo da classe  $\gamma$ . Da mesma forma, a probabilidade de falha de chamadas em *handoff* da classe  $\gamma$ ,  $P_{FH\gamma}$ , é a soma das probabilidades estacionárias de todos estados que não são capazes de aceitar mais um usuário em *handoff* da classe  $\gamma$ .

Cada tipo de sistema é analisado nas seções seguintes, considerando as variações segundo a reserva de canais para atender aos requisitos de qualidade de serviço.

#### 8.3.1

##### Sistema com M Classes de Usuários, sem Canais de Guarda

No caso em que não há reserva de canais, todos usuários têm acesso a todos  $N_c$  canais do sistema, sem distinção de classe, chamadas novas ou em *handoff*.

A taxa de chegada de usuários da classe  $\gamma$ ,  $\lambda_\gamma$ , é a soma das taxas de chegadas de novos,  $\lambda_{N\gamma}$ , e de *handoff*,  $\lambda_{H\gamma}$ , equação (9-6).

$$\lambda_\gamma = \lambda_{N\gamma} + \lambda_{H\gamma} \quad (8-13)$$

Como não há canais de guarda, a probabilidade de bloqueio de uma chamada nova da classe  $\gamma$ ,  $P_{BN\gamma}$  é igual a probabilidade de falha de uma chamada em *handoff* da mesma classe,  $P_{FH\gamma}$ .

Dado que o sistema está em um estado  $(n_1, n_2, \dots, n_M)$ , que ocupa  $BT_{(n_1, n_2, \dots, n_M)}$  canais, (8-14); o bloqueio de uma chamada ocorre quando chega a solicitação de uma chamada da classe  $\gamma$  e o sistema não possui  $B_\gamma$  recursos livres para atendê-la, conforme a equação (8-15). Neste caso, a probabilidade estacionária do estado  $(n_1, n_2, \dots, n_M)$ ,  $P_{(n_1, n_2, \dots, n_M)}$ , deve ser incluída no somatório de probabilidades estacionárias dos estados que bloqueiam chamadas da classe  $\gamma$ .

$$BT_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} = \sum_{\gamma=1}^M n_\gamma B_\gamma \quad (8-14)$$

$$BT_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} > N_c - B_\gamma \quad (8-15)$$

A probabilidade de bloqueio de uma chamada da classe  $\gamma$  é definida pela soma das probabilidades estacionárias de todos os estados  $(n_1, n_2, \dots, n_M)$  onde não há recursos disponíveis,  $B_\gamma$ , para mais um usuário da classe  $\gamma$ , conforme a equação (8-16).

$$P_{BN\gamma} = P_{FH\gamma} = \sum_{\{(n_1, n_2, \dots, n_M) | BT_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} > N_c - B_\gamma\}} P_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} \quad (8-16)$$

### 8.3.2

#### Sistema com M classes de Usuários, com Número Inteiro de Canais de Guarda

No caso de sistemas com reserva de recursos, a taxa de chegada a cada estado depende do tipo de usuário que pode ser admitido no sistema, ou não, correspondendo aos canais ordinários ou de guarda. Isso determina novos valores para as probabilidades estacionárias dos estados da cadeia, em relação ao caso sem canais de guarda analisado no ítem anterior. Além disso, por construção, a probabilidade de falha de uma chamada em *handoff* é menor do que a probabilidade de bloqueio de uma chamada nova, pois há um número maior de estados que determinam o bloqueio de uma chamada nova do que de uma chamada em *handoff*.

Nos estados que correspondem aos canais ordinários, não há distinção entre usuários novos e *handoff*; portanto, a taxa de chegada a cada estado é definida pela soma das taxas de chegada de chamadas em *handoff* e de chamadas novas, equação (8-17).

$$\lambda_\gamma = \lambda_{N\gamma} + \lambda_{H\gamma} \quad (8-17)$$

A taxa de chegada aos estados correspondentes aos canais de guarda, é apenas a taxa de chegada de chamadas em *handoff*, dada pela equação (8-18).

$$\lambda_\gamma = \lambda_{H\gamma} \quad (8-18)$$

O estado  $(n_1, n_2, \dots, n_M)$  é definido como ordinário para a classe  $\gamma$  se, ao aceitar mais um usuário da classe  $\gamma$ , ainda restarem pelo menos os  $N_{CG\gamma}$  canais de guarda para um eventual usuário em *handoff* da classe  $\gamma$ . Tal verificação é feita de acordo com a equação (8-19), onde se mantém a notação  $BT_{(n_1, n_2, \dots, n_M)}$  como sendo o total de recursos utilizados pelos usuários ativos do estado  $(n_1, n_2, \dots, n_M)$  e  $B_\gamma$  como a quantidade de recursos do usuário da classe  $\gamma$ .

$$BT_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} + B_\gamma \leq N_c - N_{CG\gamma} \quad (8-19)$$

A probabilidade de falha de uma chamada em *handoff* da classe  $\gamma$  é dada na equação (8-20) pelo somatório das probabilidades estacionárias de todos os estados  $(n_1, n_2, \dots, n_M)$  onde não há recursos disponíveis para mais um usuário da classe  $\gamma$ .

$$P_{FH\gamma} = \sum_{\{(n_1, n_2, \dots, n_M) | BT_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} > N_c - B_\gamma\}} P_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} \quad (8-20)$$

A probabilidade de bloqueio de uma chamada nova da classe  $\gamma$  é definida pela soma das probabilidades estacionárias de todos os estados onde não há recursos disponíveis,  $B_\gamma$ , para mais um usuário novo da classe  $\gamma$ , considerando a guarda de  $N_{CG\gamma}$  canais para os usuários em *handoff*, conforme a equação (8-21).

$$P_{BN\gamma} = \sum_{\{(n_1, n_2, \dots, n_M) | BT_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} > N_c - N_{CG\gamma} - B_\gamma\}} P_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} \quad (8-21)$$

### 8.3.3

#### Sistema com M Classes de Usuários, com Número Fracionário de Canais de Guarda

No sistema de  $M$  classes de usuários, que utiliza um número fracionário de canais de guarda,  $N_{CG}$  é um número real podendo, ou não, ser um inteiro. O sistema possui  $N_c$  canais ou recursos e é representado pela cadeia de Markov de dimensão  $M$ . O número de canais de guarda da classe  $\gamma$  é  $N_{CG\gamma}$ .

Para um número fracionário de canais de guarda, o procedimento para a definição dos estados existentes é o mesmo adotado no caso de número inteiro de canais de guarda. No entanto, há diferenças nas taxas de chegada,  $\lambda_\gamma$ , quando o sistema se encontra no estado  $(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)$  e chega um usuário da classe  $\gamma$  levando o sistema ao estado  $(n_1, n_2, \dots, n_\gamma + 1, \dots, n_M)$ .

Os usuários em *handoff* da classe  $\gamma$  tem acesso a todos  $N_c$  canais do sistema. Os usuários novos tem acesso apenas aos estados que não contenham recursos reservados para o *handoff*. No caso de número fracionário de canais de guarda, há ainda um estado intermediário para cada classe  $\gamma$ , cuja banda total é  $T_\gamma$ , que só é alcançado parcialmente pelos usuários novos. O valor de  $T_\gamma$  é definido pela equação (8-22).

$$T_\gamma = N_c - \lfloor N_{CG\gamma} \rfloor \quad (8-22)$$

As restrições aos estados mudam os valores correspondentes às taxas de chegada do caso fracionário em relação ao caso de número inteiro de

canais de guarda.

A probabilidade do usuário novo da classe  $\gamma$  ser bloqueado na chegada ao estado  $T_\gamma$  é dada por  $p_\gamma$  que é a parte fracionária do número de canais de guarda da classe  $\gamma$ , conforme a equação (8-23).

$$N_{CG\gamma} = \lfloor N_{CG\gamma} \rfloor + p_\gamma \quad (8-23)$$

O estado  $T_\gamma$  só é alcançado pelos usuários novos com probabilidade  $(1 - p_\gamma)$ . A figura 8.4 apresenta o estado  $T_\gamma$ , seus estados vizinhos e suas respectivas taxas de chegada e saída ao longo da dimensão  $\gamma$ .

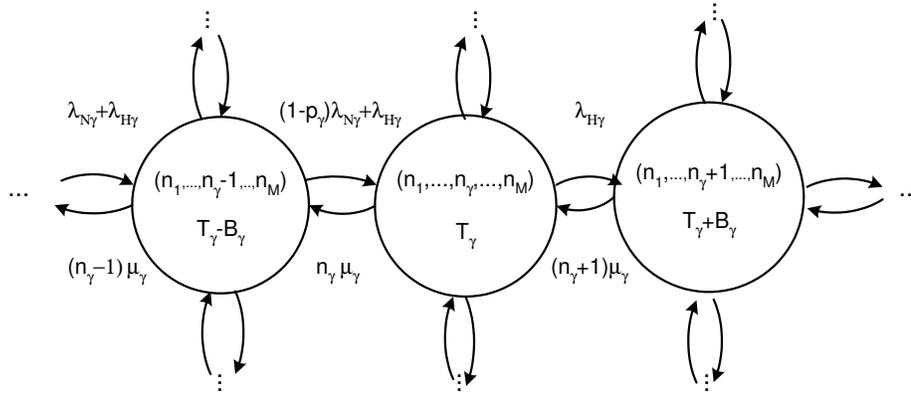


Figura 8.4: Dimensão  $\gamma$  da Cadeia de Markov de dimensão  $M$ , com número fracionário de canais de guarda.

Há três tipos de estados: estados que podem ser alcançados por usuários novos e por aqueles em *handoff*, acesso parcial aos usuários novos e total aos usuários em *handoff*; e estados com acesso apenas aos usuários em *handoff* e acesso negado aos usuários novos. A passagem do estado  $(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)$  para o estado  $(n_1, n_2, \dots, n_\gamma + 1, \dots, n_M)$ , e vice-versa, se dá com a chegada, ou saída, de um usuário da classe  $\gamma$ . A taxa de chegada de usuários da classe  $\gamma$  ao estado  $(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)$  é denotada por  $\lambda_{\gamma(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)}$ .

$$\lambda_{\gamma(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)} = \begin{cases} \lambda_{N\gamma} + \lambda_{H\gamma} & , BT_{(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)} < T_\gamma - B_\gamma \\ (1 - p_\gamma)\lambda_{N\gamma} + \lambda_{H\gamma} & , BT_{(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)} = T_\gamma - B_\gamma \\ \lambda_{H\gamma} & , BT_{(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)} > T_\gamma - B_\gamma \end{cases}$$

A probabilidade de falha de uma chamada em *handoff* da classe  $\gamma$  é dada pela soma das probabilidades estacionárias de todos os estados onde

não há recursos disponíveis para mais um usuário da classe  $\gamma$ , tal como na equação (8-24).

$$P_{FH\gamma} = \sum_{\{(n_1, n_2, \dots, n_M) | BT_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} > N_c - B_\gamma\}} P_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} \quad (8-24)$$

A probabilidade de bloqueio de uma chamada nova da classe  $\gamma$  é definida por dois somatórios, conforme a equação (8-25). No primeiro são incluídas as probabilidades estacionárias de todos os estados onde não há recursos disponíveis,  $B_\gamma$ , para mais um usuário novo da classe  $\gamma$ . No segundo somatório são incluídas as probabilidades estacionárias dos estados cuja banda total é  $T_\gamma$  e que bloqueiam os usuários novos com probabilidade  $p_\gamma$ .

$$P_{BN\gamma} = \sum_{\{(n_1, n_2, \dots, n_M) | BT_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} > N_c - \lfloor N_{CG\gamma} \rfloor - B_\gamma\}} P_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} + \\ + \sum_{\{(n_1, n_2, \dots, n_M) | BT_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} = N_c - \lfloor N_{CG\gamma} \rfloor - B_\gamma\}} p_\gamma P_{(n_1, n_2, \dots, n_M)}$$

### 8.3.4

#### Sistemas com Canais de Guarda e com Restrições para Usuários em Handoff

Uma solução semelhante ao sistema de canais de guarda para os usuários em *handoff* é reservar alguns canais para usuários novos de determinada classe. Tal solução é apresentada na referência [21] na tentativa de atender aos requisitos de qualidade de serviço em sistemas de múltiplas classes impondo prioridades entre as classes e entre os usuários novos e de *handoff*.

A utilização de canais de reserva tem solução semelhante ao caso dos canais de guarda. A seção seguinte apresenta um exemplo para um sistema com duas classes de usuários.

#### Exemplo de Sistema de Duas Classes com Canais de Guarda e com Restrições para Usuários em Handoff

Em um sistema de duas classes de usuários há quatro tipos de usuários: novos da classe 1,  $N1$ ; *handoff* da classe 1,  $H1$ ; novos da classe 2,  $N2$ ; e *handoff* da classe 2,  $H2$ . Para cada tipo de usuário há uma restrição diferente,  $R_i$  que corresponde ao número de canais que não podem ser

utilizados por aquele tipo de usuário. O conjunto de restrições de todos usuários é dado por  $R = \{R_{N1}, R_{H1}, R_{N2}, R_{H2}\}$ .

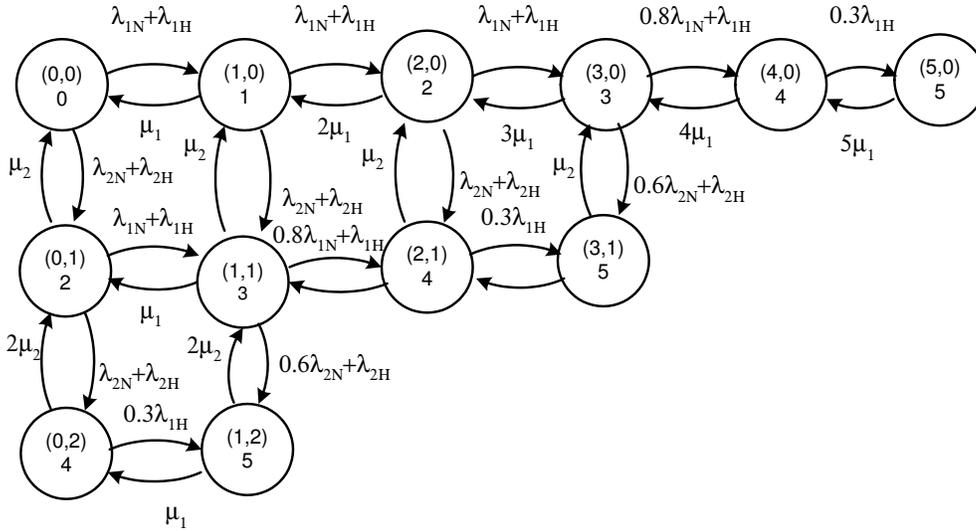


Figura 8.5: Cadeia 2D com restrições  $R_{N1} = 1.2; R_{H1} = 0.7; R_{N2} = 0.4; R_{H2} = 0$  e classes  $B_1 = 1UB, B_2 = 2UB$ .

A cadeia de Markov da figura 8.5 possui um total de 12 estados e representa um sistema com duas classes de usuários,  $B_1 = 1UB, B_2 = 2UB$  e número total de recursos,  $N_c = 5$ . As restrições de utilização dos recursos são dadas por:  $R_{N1} = 1.2; R_{H1} = 0.7; R_{N2} = 0.4; R_{H2} = 0$ .

Na figura 8.5, observa-se que do estado  $(n_1, n_2) = (3, 0)$  para  $(4, 0)$  e do estado  $(1, 1)$  para  $(2, 1)$ , a chegada de um usuário novo da classe 1 é aceita com probabilidade  $(1 - p_{N1})$  dada por:

$$1 - p_{N1} = 1 - (R_{N1} - \lfloor R_{N1} \rfloor) = 1 - (1.2 - 1) = 0.8 \quad (8-25)$$

Do estado  $(n_1, n_2) = (4, 0)$  para  $(5, 0)$ , de  $(2, 1)$  para  $(3, 1)$  e do estado  $(0, 2)$  para  $(1, 2)$ , a chegada de um usuário em *handoff* da classe 1 é aceita com probabilidade  $(1 - p_{H1})$ , definida em (8-26), e não são aceitos usuários novos.

$$1 - p_{H1} = 1 - (R_{H1} - \lfloor R_{H1} \rfloor) = 1 - (0.7 - 0) = 0.3 \quad (8-26)$$

Do estado  $(n_1, n_2) = (3, 0)$  para  $(3, 1)$  e do estado  $(1, 1)$  para  $(1, 2)$ , a chegada de um usuário novo da classe 2 é aceita com probabilidade  $(1 - p_{N2})$ ,

dada por (8-27).

$$1 - p_{N2} = 1 - (R_{N2} - \lfloor R_{N2} \rfloor) = 1 - (0.4 - 0) = 0.6 \quad (8-27)$$

As probabilidades de bloqueio de usuários novos das classes 1 e 2 são dadas pelas equações (8-28) e (8-29); as probabilidades de falha de usuários em *handoff* das classes 1 e 2 são dadas pelas equações (8-30) e (8-31), respectivamente. Cada equação é formada pela soma dos estados que levam ao bloqueio da solicitação de chamada, multiplicado pela respectiva probabilidade de bloqueio. Quando o sistema se encontra em determinado estado, a probabilidade de bloqueio é 1 ou  $p = R_i - \lfloor R_i \rfloor$ , correspondendo à restrição,  $R_i$ , do tipo de chamada solicitada.

$$P_{BN1} = [P_{(3,0)} + P_{(1,1)}]0.2 + [P_{(4,0)} + P_{(5,0)} + P_{(2,1)} + P_{(3,1)} + P_{(0,2)} + P_{(1,2)}] \quad (8-28)$$

$$P_{BN2} = [P_{(1,1)} + P_{(3,0)}]0.4 + [P_{(5,0)} + P_{(4,0)} + P_{(2,1)} + P_{(3,1)} + P_{(0,2)} + P_{(1,2)}] \quad (8-29)$$

$$P_{FH1} = [P_{(2,1)} + P_{(0,2)} + P_{(4,0)}]0.7 + [P_{(5,0)} + P_{(3,1)} + P_{(1,2)}] \quad (8-30)$$

$$P_{FH2} = [P_{(5,0)} + P_{(4,0)} + P_{(2,1)} + P_{(3,1)} + P_{(0,2)} + P_{(1,2)}] \quad (8-31)$$

## 8.4 Modelo Geral

Esta seção apresenta o Modelo Geral do cálculo de bloqueio e da utilização dos recursos de sistemas móveis de múltiplas classes de usuários.

O Modelo Geral consiste em escrever de forma genérica as expressões para a probabilidade de bloqueio de chamadas novas e para a probabilidade de falha de chamadas em *handoff*. Esta solução deve incluir todos os casos possíveis de reserva de canais analisados separadamente nas seções anteriores. Para tal, é necessário definir expressões para as taxas de chegada de usuários de cada classe que incluam todos os casos de restrição.

Alguns conceitos já foram definidos nas seções anteriores e serão aqui repetidos para que o modelo geral fique completo.

### 8.4.1 Restrições de Qualidade de Serviço

Em um sistema de  $M$  classes de usuários, existem  $2M$  restrições de qualidade de serviço do tipo  $R_i$  dadas em (8-32).

$$R_i \in \{R_{N1}, R_{H1}, \dots, R_{NM}, R_{HM}\} \quad (8-32)$$

A restrição  $R_i$  corresponde ao número de canais ou recursos do sistema aos quais o usuário não tem acesso. Valores diferentes de restrição permitem que haja prioridade entre as classes e os tipos de usuário. Quanto menor a restrição aos canais, maior a prioridade do usuário na utilização dos recursos do sistema. O usuário com prioridade máxima é aquele com acesso a todos os recursos, ou seja, restrição nula.

Com a chegada de um usuário da classe  $\gamma$ , é necessário verificar se o usuário é novo,  $N$ , ou é um usuário em *handoff*,  $H$ , e qual é a restrição correspondente,  $R_{N\gamma}$  ou  $R_{H\gamma}$ .

O valor da restrição é separado em parte inteira e parte fracionária, apresentadas na equação (8-33), onde  $\lfloor R_i \rfloor$  é a parte inteira e  $p_i$  é a parte fracionária.

$$R_i = \lfloor R_i \rfloor + p_i \quad (8-33)$$

### 8.4.2 Restrições de Banda

A banda total ocupada pelo estado  $(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)$  é  $BT_{(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)}$  dada pela equação (8-34).

$$BT_{(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)} = \sum_{k=1}^M n_k B_k \quad (8-34)$$

A condição de existência do estado é que sua banda total seja menor ou igual ao total de recursos do sistema,  $N_c$ , dada na equação (8-35).

$$BT_{(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)} \leq N_c \quad (8-35)$$

### 8.4.3 Taxa de Chegada de Usuários

Dado que o sistema se encontra no estado  $(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)$ , a taxa de chegada de usuários da classe  $\gamma$ ,  $\lambda_\gamma$ , levará o sistema a uma

mudança para o estado  $(n_1, n_2, \dots, n_\gamma + 1, \dots, n_M)$ . A taxa de chegada,  $\lambda_\gamma$ , depende da existência do estado seguinte e das restrições de qualidade de serviço,  $R$ , definido em (8-32). No modelo desenvolvido neste trabalho, tais restrições são incluídas no coeficiente  $a_{R\gamma}$  que define a probabilidade de uma chamada com restrição  $R\gamma$  ser aceita, dado que o sistema se encontra no estado  $(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)$ . A figura 8.6 apresenta o estado genérico  $(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)$  de uma cadeia de Markov de dimensão  $M$  qualquer e suas respectivas taxas de chegada de usuários das  $M$  classes expressas pelos coeficientes  $a_{N\gamma}$  e  $a_{H\gamma}$ .

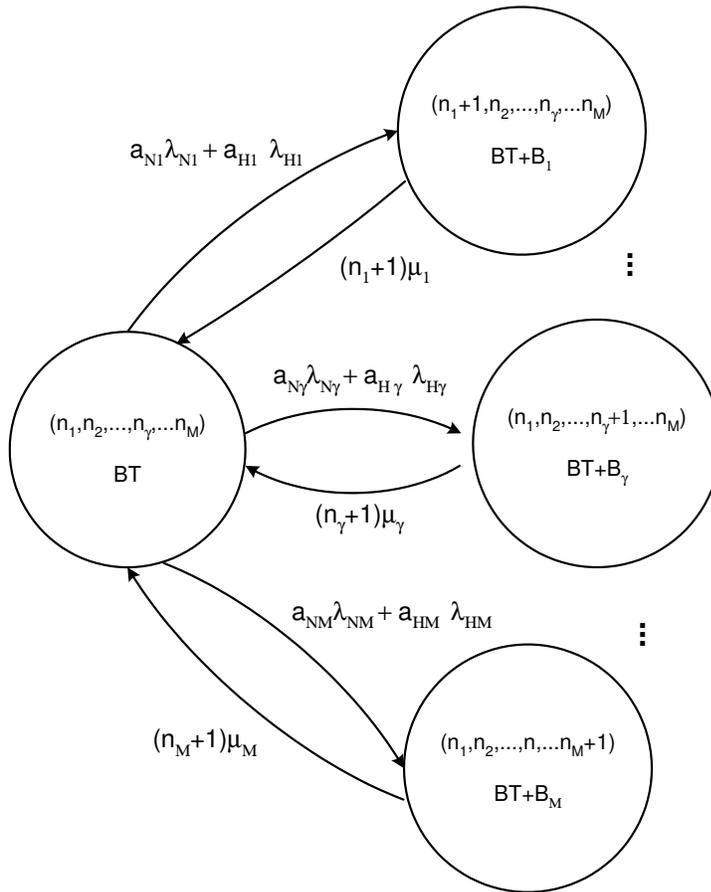


Figura 8.6: Estado genérico  $(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)$  da cadeia de Markov e suas taxas de chegada de usuários.

Dado que o sistema se encontra no estado  $(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)$ , a taxa de chegada de usuários da classe  $\gamma$ ,  $\lambda_\gamma$ , é dada na equação (8-36), onde os coeficientes  $a_{N\gamma}$  e  $a_{H\gamma}$  definem as probabilidades dos usuários novos e de

*handoff* da classe  $\gamma$  serem aceitos.

$$\lambda_\gamma = a_{N\gamma}\lambda_{N\gamma} + a_{H\gamma}\lambda_{H\gamma} \quad (8-36)$$

### Definição da Existência do Estado Seguinte

Quando o sistema se encontra no estado  $(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)$ , a solicitação de chamada de um usuário da classe  $\gamma$  propõe a possível mudança para o estado  $(n_1, n_2, \dots, n_\gamma + 1, \dots, n_M)$ , se este estado existir.

A montagem da cadeia de Markov que modela o sistema é feita verificando a existência de cada estado. Se a equação (8-37) for verdadeira, o estado  $(n_1, n_2, \dots, n_{\gamma+1}, \dots, n_M)$  existe e sua demanda total de recursos é  $BT_{(n_1, n_2, \dots, n_{\gamma+1}, \dots, n_M)}$  definida em (8-38).

$$BT_{(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)} + B_\gamma \leq N_c \quad (8-37)$$

$$BT_{(n_1, n_2, \dots, n_{\gamma+1}, \dots, n_M)} = BT_{(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)} + B_\gamma \quad (8-38)$$

### Definição dos Coeficientes de Taxa de Chegada de Usuários Novos e de Handoff

Os coeficientes  $a_{N\gamma}$  e  $a_{H\gamma}$  são definidos pela probabilidade de aceitação de usuário, novo ou em *handoff*, da classe  $\gamma$ ,  $N_\gamma$  ou  $H_\gamma$ , dado que o sistema se encontra no estado  $(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)$ .

$$a_{N\gamma} \Big|_{(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)} = \begin{cases} 1 & , N_c - BT_{(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)} - B_\gamma > \lfloor R_{N\gamma} \rfloor \\ (1 - p_{N\gamma}) & , N_c - BT_{(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)} - B_\gamma = \lfloor R_{N\gamma} \rfloor \\ 0 & , N_c - BT_{(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)} - B_\gamma < \lfloor R_{N\gamma} \rfloor \end{cases} \quad (8-39)$$

$$a_{H\gamma} \Big|_{(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)} = \begin{cases} 1 & , N_c - BT_{(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)} - B_\gamma > \lfloor R_{H\gamma} \rfloor \\ (1 - p_{H\gamma}) & , N_c - BT_{(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)} - B_\gamma = \lfloor R_{H\gamma} \rfloor \\ 0 & , N_c - BT_{(n_1, n_2, \dots, n_\gamma, \dots, n_M)} - B_\gamma < \lfloor R_{H\gamma} \rfloor \end{cases} \quad (8-40)$$

Conforme as equações (8 – 38) e (8 – 39), há três casos possíveis para os coeficientes  $a_{N\gamma}$  e  $a_{H\gamma}$  que dependem do valor da restrição do usuário da

classe  $\gamma$  e do estado em que o sistema se encontra. A restrição pode assumir os valores  $R_{N\gamma}$  e  $R_{H\gamma}$ , correspondendo aos valores de usuários novos e de *handoff*, respectivamente.

#### 8.4.4 Probabilidade de Bloqueio de Chamadas

Seja o sistema com total de  $N_c$  unidades de banda e  $M$  classes de usuários que se dividem em usuários novos e em *handoff*. Cada classe possui uma demanda de recursos igual a  $B_\gamma$  e taxa de chegada de usuários novos e em *handoff* respectivamente igual a  $\lambda_{N\gamma}$  e  $\lambda_{H\gamma}$ .

A probabilidade de bloqueio de solicitação de chamada nova da classe  $\gamma$  é dada na equação (8-41) onde os conjuntos A e B estão definidos em (8-42) e (8-43).

$$P_{BN\gamma} = \sum_{n_1=0}^{\lfloor \frac{N_c}{B_1} \rfloor} \dots \sum_{n_M=0}^{\lfloor \frac{N_c}{B_M} \rfloor} P(n_1, n_2, \dots, n_M) \Big|_{(n_1, n_2, \dots, n_M) \in A} + \\ + (R_{N\gamma} - \lfloor R_{N\gamma} \rfloor) \times \sum_{n_1=0}^{\lfloor \frac{N_c}{B_1} \rfloor} \dots \sum_{n_M=0}^{\lfloor \frac{N_c}{B_M} \rfloor} P(n_1, n_2, \dots, n_M) \Big|_{(n_1, n_2, \dots, n_M) \in B} \quad (8-41)$$

$$A = \left\{ (n_1, n_2, \dots, n_M) \Big| \sum_{k=1}^M n_k B_k > N_c - \lfloor R_{N\gamma} \rfloor - B_\gamma \right\} \quad (8-42)$$

$$B = \left\{ (n_1, n_2, \dots, n_M) \Big| \sum_{k=1}^M n_k B_k = N_c - \lfloor R_{N\gamma} \rfloor - B_\gamma \right\} \quad (8-43)$$

De forma semelhante, a probabilidade de falha de chamada em *handoff* da classe  $\gamma$  é dada na equação (8-44) onde os conjuntos C e D estão definidos em (8-45) e (8-46).

$$P_{FH\gamma} = \sum_{n_1=0}^{\lfloor \frac{N_c}{B_1} \rfloor} \dots \sum_{n_M=0}^{\lfloor \frac{N_c}{B_M} \rfloor} P(n_1, n_2, \dots, n_M) \Big|_{(n_1, n_2, \dots, n_M) \in C} + \\ + (R_{H\gamma} - \lfloor R_{H\gamma} \rfloor) \times \sum_{n_1=0}^{\lfloor \frac{N_c}{B_1} \rfloor} \dots \sum_{n_M=0}^{\lfloor \frac{N_c}{B_M} \rfloor} P(n_1, n_2, \dots, n_M) \Big|_{(n_1, n_2, \dots, n_M) \in D} \quad (8-44)$$

$$C = \left\{ (n_1, n_2, \dots, n_M) \left| \sum_{k=1}^M n_k B_k > N_c - \lfloor R_{H\gamma} \rfloor - B_\gamma \right. \right\} \quad (8-45)$$

$$D = \left\{ (n_1, n_2, \dots, n_M) \left| \sum_{k=1}^M n_k B_k = N_c - \lfloor R_{H\gamma} \rfloor - B_\gamma \right. \right\} \quad (8-46)$$

## 8.5

### Utilização

A utilização normalizada dos recursos do sistema pode ser obtida pela razão entre o valor esperado do número de Unidades de Banda, UB, utilizados no sistema e a quantidade total de recursos  $N_c$ , de acordo com a equação (8-47) ou pela equação (8-48).

$$U = \frac{\mathbb{E}[BT]}{N_c} \quad (8-47)$$

$$U = \frac{\sum_{i=1}^K BT_{(n_1, n_2, \dots, n_M)} P_{(n_1, n_2, \dots, n_M)}}{N_c} \quad (8-48)$$

## 8.6

### Validação dos Resultados Analíticos para Sistemas de Múltiplas Classes de Usuários

O modelo desenvolvido neste capítulo foi implementado em um programa em  $MATLAB_{\odot}$  que faz parte deste trabalho de tese.

O programa em  $MATLAB_{\odot}$  utiliza as expressões do modelo para calcular a probabilidade de bloqueio de uma chamada nova, a probabilidade de falha de uma chamada em *handoff* e a utilização normalizada dos recursos de um sistema de múltiplas classes de usuários.

Nesta seção são comparados os resultados analíticos, obtidos em  $MATLAB_{\odot}$ , com os resultados de simulação, realizados com o simulador desenvolvido neste trabalho e descrito no capítulo 4 desta tese.

Foram calculados em  $MATLAB_{\odot}$  e simulados em  $C++$  os casos que utilizam os seguintes valores para o número de canais de guarda:  $0CG$ ;  $0.5CG$ ;  $1CG$  e  $2CG$ .

A intensidade total de tráfego é definida pela equação (8-49) como a soma da intensidade de solicitação de recursos de cada classe.

$$\rho = \sum_{\gamma=1}^M \rho_{\gamma} \quad (8-49)$$

Para cada classe de usuários,  $\gamma$ , a intensidade de solicitação de recursos é dada por (8-50); onde  $\lambda_{\gamma}$  é a taxa de chegada de usuários da classe  $\gamma$ ,  $\mu_{\gamma}$  é a taxa de terminação de serviço,  $B_{\gamma}$  é a banda solicitada pelo usuário da classe  $\gamma$  e  $N_c$  é a quantidade total de canais do sistema.

$$\rho_{\gamma} = B_{\gamma} \frac{\lambda_{\gamma}}{\mu_{\gamma} N_c} \quad (8-50)$$

No caso apresentado nas figuras 8.7, 8.8, 8.9 e 8.10, o sistema possui duas classes de usuários. A classe 1 utiliza  $1UB$  e a classe 2 utiliza  $2UB$ ,  $B_1 = 1UB$  e  $B_2 = 2UB$ . O sistema apresenta um total de 30 unidades de banda,  $N_c = 30$ . As taxas  $\mu_1$  e  $\mu_2$  são iguais a  $\mu = 120s$ .

As taxas  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são iguais a  $\lambda$ . Portanto, a equação (8-49) pode ser escrita como (8-51) que pode ser reduzida à equação (8-52).

$$\rho = \frac{B_1 \lambda_1}{\mu_1 N_c} + \frac{B_2 \lambda_2}{\mu_2 N_c} \quad (8-51)$$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu N_c} (B_1 + B_2) \quad (8-52)$$

As taxas de chegada de usuários novos e em *handoff* de cada classe são iguais.

$$\lambda_N = \lambda_{N1} = \lambda_{N2} \quad (8-53)$$

$$\lambda_H = \lambda_{H1} = \lambda_{H2} \quad (8-54)$$

A taxa total de chegada de usuários de cada classe é dada pela soma das taxas de chegada de usuários novos e *handoff* da mesma classe,  $\gamma$ , equação (8-55).

$$\lambda = \lambda_N + \lambda_H \quad (8-55)$$

A taxa de mobilidade,  $\theta = \frac{\lambda_H}{\lambda_N}$ , é constante e vale  $\theta = 2$ .

Os resultados para a classe 1 são apresentados nas figuras 8.7 e 8.8 e os resultados para a classe 2 são apresentados nas figuras 8.9 e 8.10.

Nas figuras 8.7, 8.8, 8.9 e 8.10 foram considerados os casos sem canais

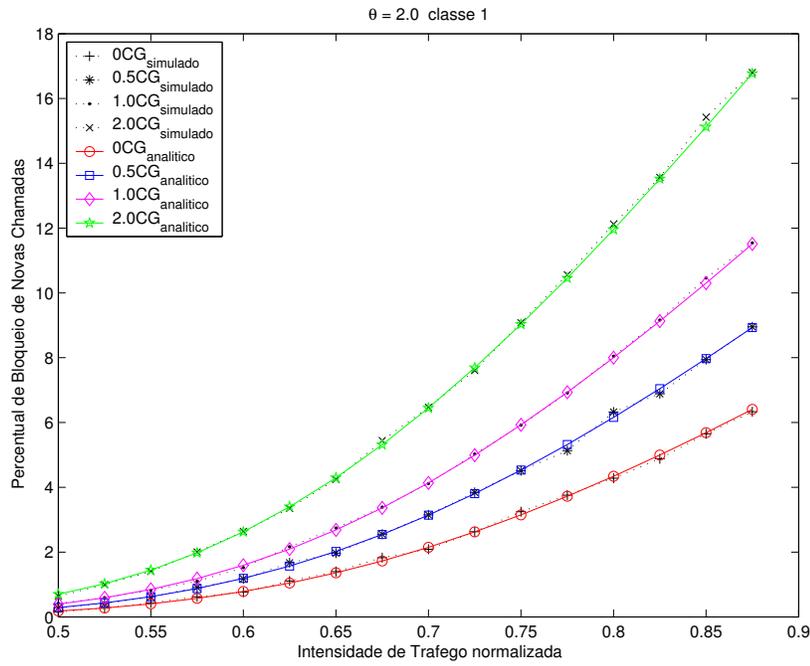


Figura 8.7: Percentual de bloqueio de chamadas novas da classe 1 versus intensidade de tráfego total normalizada,  $\theta = 2$ ,  $B_1 = 1_{UB}$ ;  $B_2 = 2_{UB}$ .

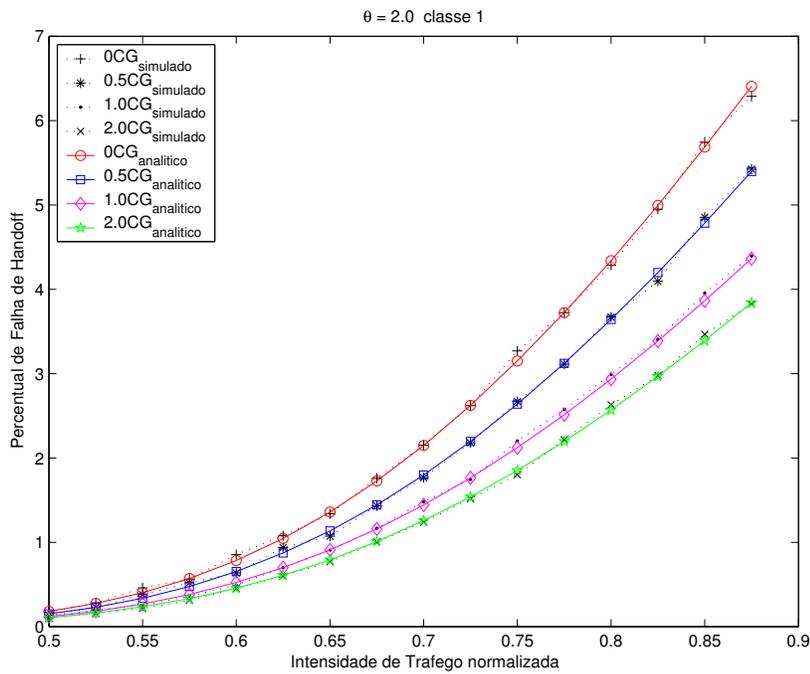


Figura 8.8: Percentual de falha de chamadas em *handoff* da classe 1 versus intensidade de tráfego total normalizada,  $\theta = 2$ ,  $B_1 = 1_{UB}$ ;  $B_2 = 2_{UB}$ .

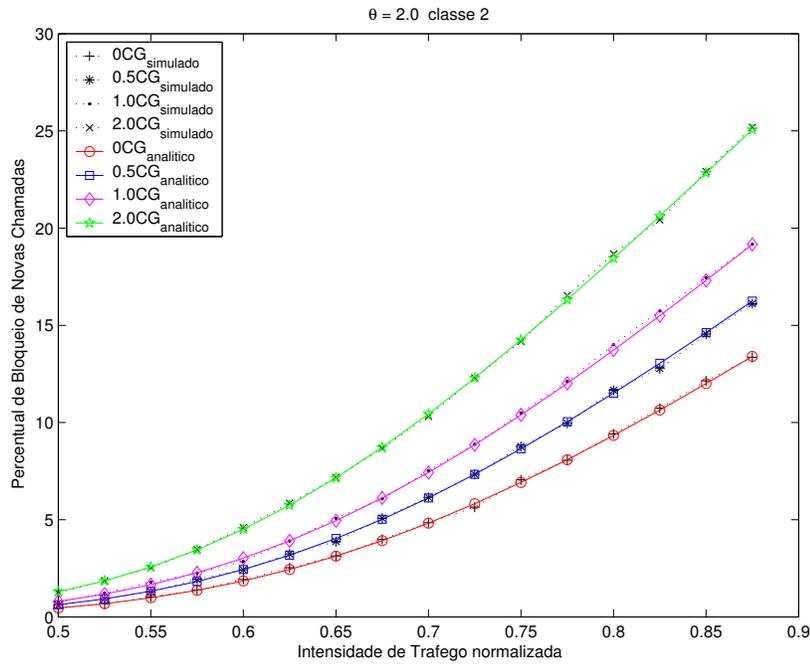


Figura 8.9: Percentual de bloqueio de chamadas novas da classe 2 versus intensidade de tráfego total normalizada,  $\theta = 2$ ,  $B_1 = 1_{UB}$ ;  $B_2 = 2_{UB}$ .

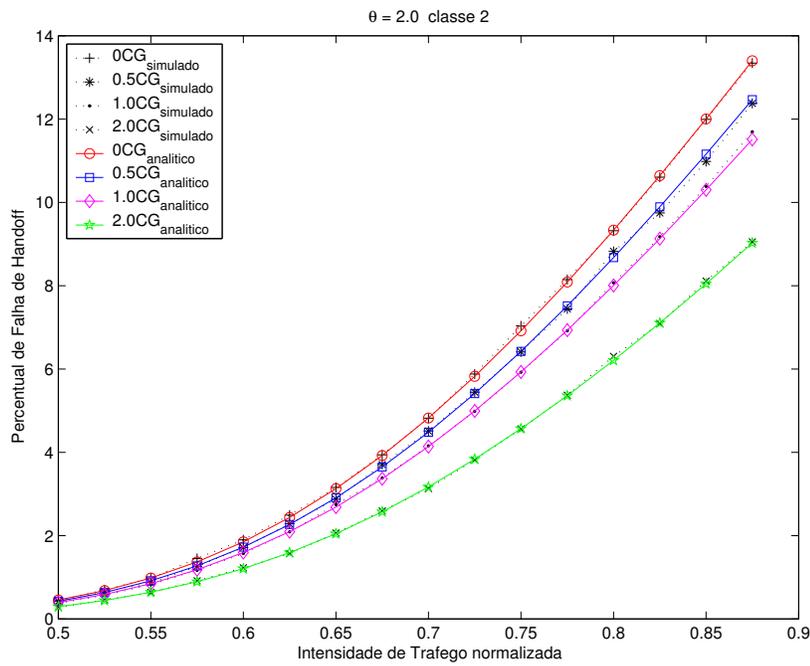


Figura 8.10: Percentual de falha de chamadas em *handoff* da classe 2 versus intensidade de tráfego total normalizada,  $\theta = 2$ ,  $B_1 = 1_{UB}$ ;  $B_2 = 2_{UB}$ .

de guarda,  $0CG$ ; com número inteiro de canais de guarda,  $1CG$  e  $2CG$ ; e também com número fracionário de canais de guarda,  $0.5$ . Observa-se que os resultados simulados em linguagem  $C++$  concordam perfeitamente com os resultados analíticos calculados em  $MATLAB_{\text{©}}$  para todos os casos de número de canais de guarda e para as duas classes de usuários, tanto para o percentual de bloqueio de chamadas novas quanto para o percentual de falha de chamadas em *handoff*. Diante desses dados, validamos os resultados do simulador desenvolvido neste trabalho para múltiplas classes de usuários. Este simulador é utilizado no capítulo 9 para verificar o desempenho dos algoritmos dinâmicos de controle de admissão de chamadas em sistemas de múltiplas classes propostos nesta tese.

## 8.7

### Resultados Analíticos para Sistemas de Múltiplas Classes de Usuários com Restrições Múltiplas

Nesta seção são apresentados os resultados analíticos correspondentes ao modelo desenvolvido nas seções anteriores deste capítulo, implementado em  $MATLAB_{\text{©}}$ .

O programa utiliza as expressões do modelo para calcular a probabilidade de bloqueio de uma chamada nova, a probabilidade de falha de uma chamada em *handoff* e a utilização normalizada dos recursos de um sistema de múltiplas classes de usuários.

No programa, foram considerados até quatro classes de usuários, ( $M \leq 4$ ), incluindo seus usuários novos e em *handoff*, que formam um total de oito tipos de usuários diferentes.

Foram considerados os casos em que o sistema utiliza reserva de canais tanto para usuários em *handoff* quanto para usuários novos.

A quantidade de canais reservados é diferente para cada tipo de usuário, podendo também assumir valores fracionários. A restrição de canais é definida pelo vetor restrição  $R$  definido em (8-56).

$$R = (R_{N1}, R_{N2}, \dots, R_{NM}, R_{H1}, R_{H2}, \dots, R_{HM}) \quad (8-56)$$

De acordo com o valor da restrição imposta a cada tipo de usuário é possível impor prioridades aos diversos tipos de usuários. As restrições variam de acordo com sua classe e se o usuário é novo ou está em *handoff*.

Os seguintes parâmetros do programa devem ser definidos no início do programa:

- Número de classes do sistema, ( $M \leq 4$ );
- Total de recursos que o sistema possui,  $N_c$ ;
- Número de unidades de banda de cada classe,  $B_\gamma$ ;
- Taxa de mobilidade dos usuários,  $\theta$ ;
- Intensidade de tráfego normalizada,  $\rho$ ;
- Proporção de usuários em cada classe;
- Taxa de terminação de serviço de cada classe,  $\mu_\gamma$
- Valor da restrição de recursos de cada um dos  $2M$  tipos de usuário do sistema.

Nos casos apresentados nas seções seguintes, os resultados correspondem à taxa de duração da chamada igual a 120s e taxa total de intensidade de tráfego  $\rho$ , dada pela equação (8-49).

### 8.7.1

#### Resultados Analíticos para Sistemas de Duas Classes de Usuários

No caso do sistema de duas classes de usuários, são quatro tipos diferentes de usuário solicitando recursos do sistema: usuário novo classe 1,  $N1$ ; usuário novo classe 2,  $N2$ ; usuário em *handoff* classe 1,  $H1$ ; e usuário em *handoff* classe 2,  $H2$ . Para cada um dos quatro tipos de usuários, há um valor diferente de restrição definido pelo vetor  $R$ .

Nos casos cujos resultados são apresentados nas seções seguintes, a classe 1 utiliza  $1UB$  e a classe 2 utiliza  $2UB$ ,  $B_1 = 1$  e  $B_2 = 2$ . O sistema possui um total de recursos  $N_c = 30$ . As taxas de chegada de usuários das classes 1 e 2 são iguais. A duração média da chamada é de 120s. A taxa de mobilidade,  $\theta = \frac{\lambda_H}{\lambda_N}$ , é constante e vale  $\theta = 2$ .

Na figura 8.11 são apresentadas as curvas correspondentes ao vetor restrição  $R = (0.7, 1, 0.3, 0)$ , que é o primeiro caso das curvas das figuras 8.12 e 8.13. Observa-se que, apesar dos valores das restrições aos usuários da classe 2 serem menores que os da classe 1, os percentuais de bloqueio da classe 2 são maiores que os da classe 1. Quanto maior o número de unidades de banda que a classe ocupa, maior é o seu percentual de bloqueio. O valor da restrição de cada tipo de usuário não é o único fator que define a probabilidade de bloqueio.

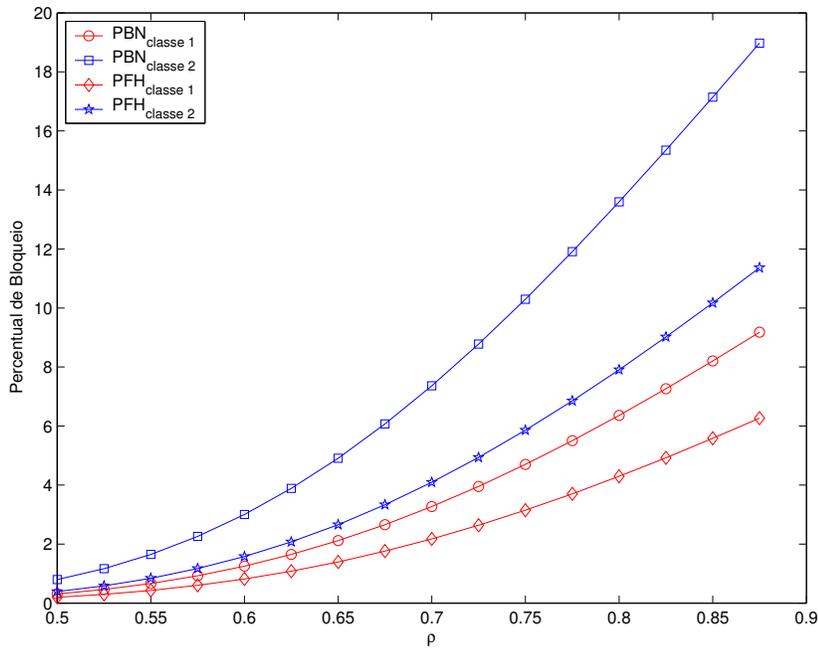


Figura 8.11: Percentual de bloqueio versus intensidade de tráfego total normalizada,  $\theta = 2$ ,  $B_1 = 1_{UB}$ ;  $B_2 = 2_{UB}$ , para vetor restrição  $R = (0.7, 1, 0.3, 0)$ .

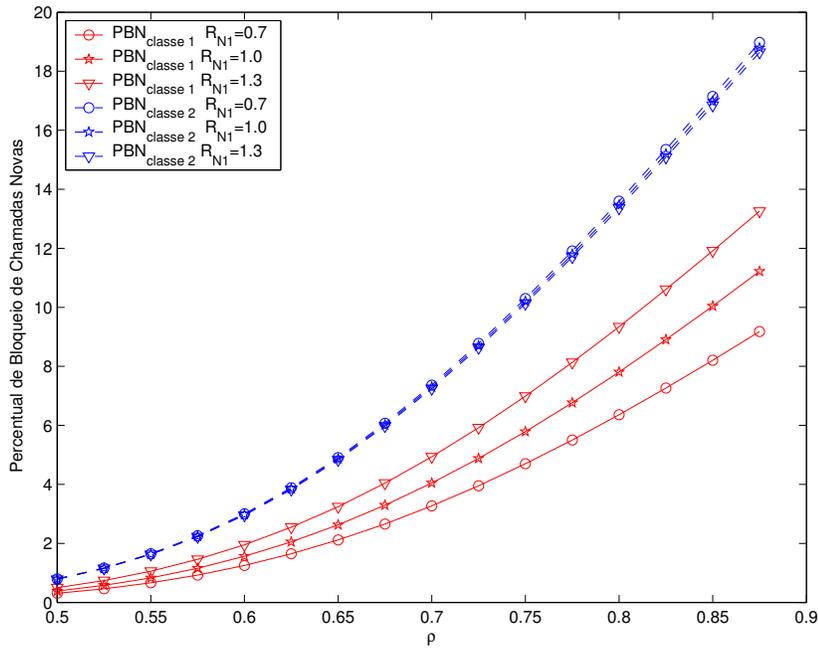


Figura 8.12: Percentual de bloqueio de chamadas novas das classes 1 e 2 versus intensidade de tráfego total normalizada,  $B_1 = 1$ ;  $B_2 = 2$ , para restrições  $R = (R_{N1}, 1, 0.3, 0)$  e  $R_{N1} = 0.7, 1$  e  $1.3$ .

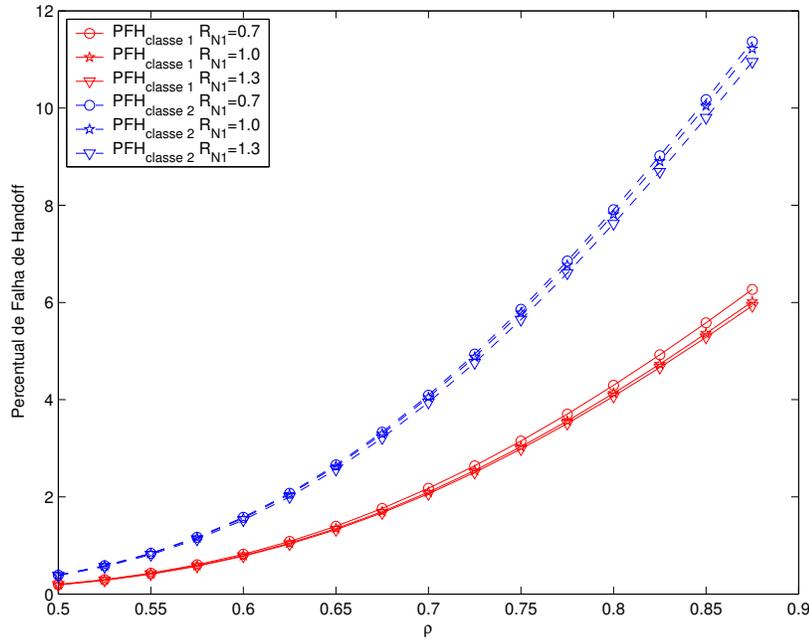


Figura 8.13: Percentual de falha de chamadas em *handoff* das classes 1 e 2 versus intensidade de tráfego total normalizada,  $B_1 = 1; B_2$ , para restrições  $R = (R_{N1}, 1, 0.3, 0)$  e  $R_{N1} = 0.7, 1$  e  $1.3$ .

**Dependência dos Percentuais de Bloqueio com a Restrição de Usuários Novos da Classe 1,  $R_{N1}$**

As curvas de percentual de bloqueio de chamadas novas e de percentual de falha de *handoff* das classes 1 e 2, respectivamente, são apresentadas nas figuras 8.12 e 8.13 para três valores diferentes de restrição de usuários novos da classe 1  $R_{N1}$ : 0.7; 1 e 1.3; enquanto que os outros valores de restrição são mantidos constantes e iguais a  $R_{N2} = 1; R_{H1} = 0.3$  e  $R_{H2} = 0$ . Na figura 8.12, observa-se que as curvas relativas ao bloqueio de novas chamadas da classe 1,  $P_{BN1}$ , sofrem grande influência da restrição  $R_{N1}$ , enquanto que as curvas  $P_{BN2}$  são muito próximas entre si para os três valores de  $R_{N1}$ . Da mesma forma, na figura 8.13, observa-se que os dois conjuntos de curvas de  $P_{FH1}$  e  $P_{FH2}$  apresentam curvas quase iguais para os três valores de  $R_{N1}$ . Conclui-se que os percentuais de bloqueio são pouco afetados pela variação de uma restrição que não a sua própria. O conjunto de probabilidades estacionárias que define o valor dos bloqueios é diretamente afetado pelo valor das próprias restrições, conforme a equação (8-41). Nos demais tipos de usuários, o percentual de bloqueio sofre apenas uma pequena flutuação devida às mudanças nos valores das taxas de chegada com o valor das restrições.

**Dependência dos Percentuais de Bloqueio com a Restrição de Usuários Novos da Classe 2,  $R_{N2}$**

Na figura 8.14 são apresentadas as curvas correspondentes ao vetor restrição ,  $R$ , dado por (8-57) que corresponde ao primeiro caso das curvas das figuras 8.15 e 8.16.

$$(R_{N1}, R_{N2}, R_{H1}, R_{H2}) = (0.9, 0.7, 0.5, 0) \tag{8-57}$$

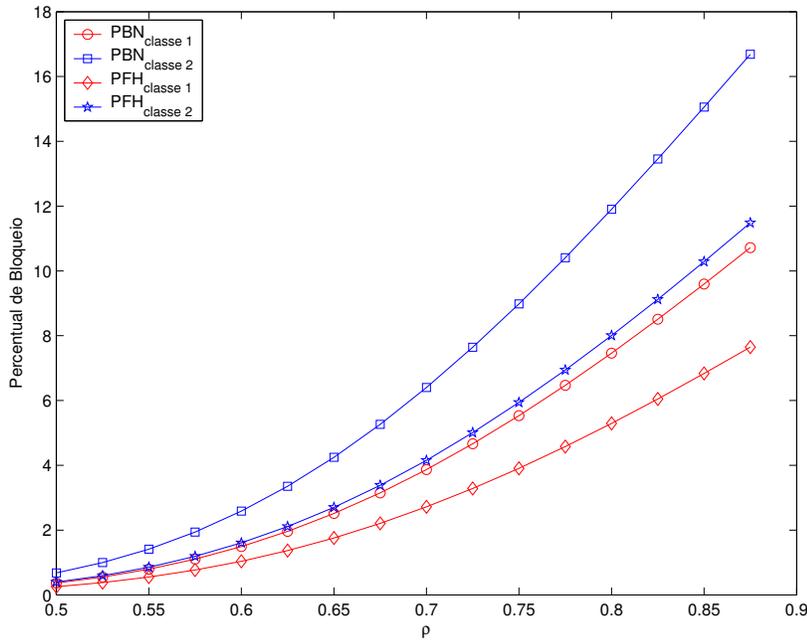


Figura 8.14: Percentual de bloqueio versus intensidade de tráfego total normalizada,  $\theta = 2$ ,  $N_c = 30$ ,  $B_1 = 1$ ,  $B_2 = 2$ , para restrição  $R = (0.9, 0.7, 0.5, 0)$ .

Comparando a figura 8.14, cujo vetor restrição é  $(0.9, 0.7, 0.5, 0)$ , com a figura 8.11 cujo vetor restrição é  $(0.7, 1, 0.3, 0)$ , observa-se que as curvas de  $P_{BN1}$  e  $P_{FH2}$  trocam de posição. Portanto, através da escolha adequada das restrições, é possível favorecer um ou outro tipo de usuário no controle de acesso dos canais. No entanto, deve-se observar que o tamanho da banda requisitada por cada classe também influencia nos percentuais de bloqueio. A classe 2, que ocupa  $2UB$ , tende a apresentar percentuais de bloqueio maiores que a classe 1, que ocupa  $1UB$ .

Na figura 8.15 são apresentadas as curvas obtidas para  $P_{BN1}$ ,  $P_{BN2}$ , e na figura 8.16 as curvas de  $P_{FH1}$  e  $P_{FH2}$ , para três valores diferentes da restrição aos usuários novos da classe 2,  $R_{N2}$ . Observa-se em 8.15 que as curvas de novas chamadas da classe 2,  $P_{BN2}$ , sofrem grande influência da restrição  $R_{N2}$ , enquanto que os outros três conjuntos de curvas  $P_{BN1}$ ,  $P_{FH1}$  e

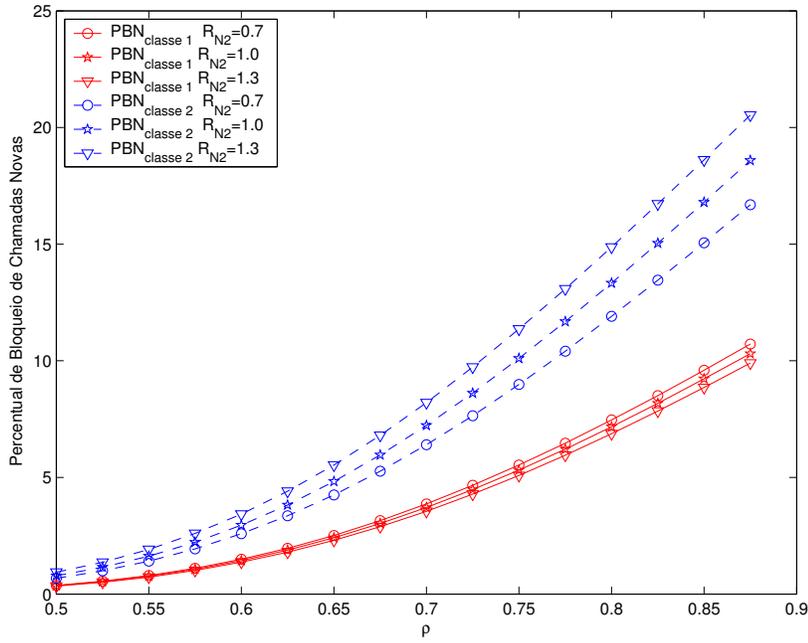


Figura 8.15: Percentual de bloqueio de chamadas novas das classes 1 e 2 versus intensidade de tráfego total normalizada,  $N_c = 30$ ,  $B_1 = 1$ ,  $B_2$ , para valores de restrição  $(0.9, R_{N2}, 0.5, 0)$  onde  $R_{N2} = 0.7, 1$  e  $1.3$

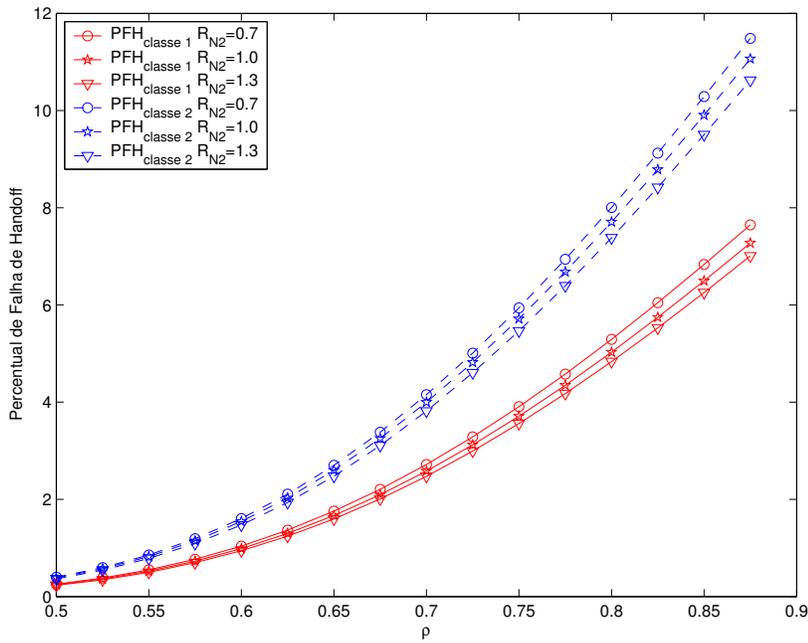


Figura 8.16: Percentual de falha de *handoff* das classes 1 e 2 versus intensidade de tráfego total normalizada,  $N_c = 30$ ,  $B_1 = 1$ ,  $B_2$ , para valores de restrição  $(0.9, R_{N2}, 0.5, 0)$  onde  $R_{N2} = 0.7, 1$  e  $1.3$

$P_{FH2}$ , apresentados em e 8.15 e e 8.16 sofrem apenas uma pequena flutuação devida a mudança das taxas de chegada aos estados. Isto reforça a conclusão obtida anteriormente para a restrição  $R_{N1}$ .

**Dependência dos Percentuais de Bloqueio com a Restrição de Usuários em Handoff da Classe 1,  $R_{H1}$**

Na figura 8.11 são apresentadas as curvas correspondentes ao vetor restrição  $(0.7, 1, 0.3, 0)$ . Este caso corresponde a curva do meio das figuras 8.17 e 8.18 que apresentam o efeito da variação da restrição de usuários em *handoff* da classe 1 para três valores diferentes de restrição de usuários em *handoff* da classe 1,  $R_{H1}$ : 0; 0.3 e 0.6 enquanto que os outros valores de restrição são mantidos constantes e iguais a  $R_{N1} = 0.7$ ,  $R_{N2} = 1$  e  $R_{H2} = 0$ .

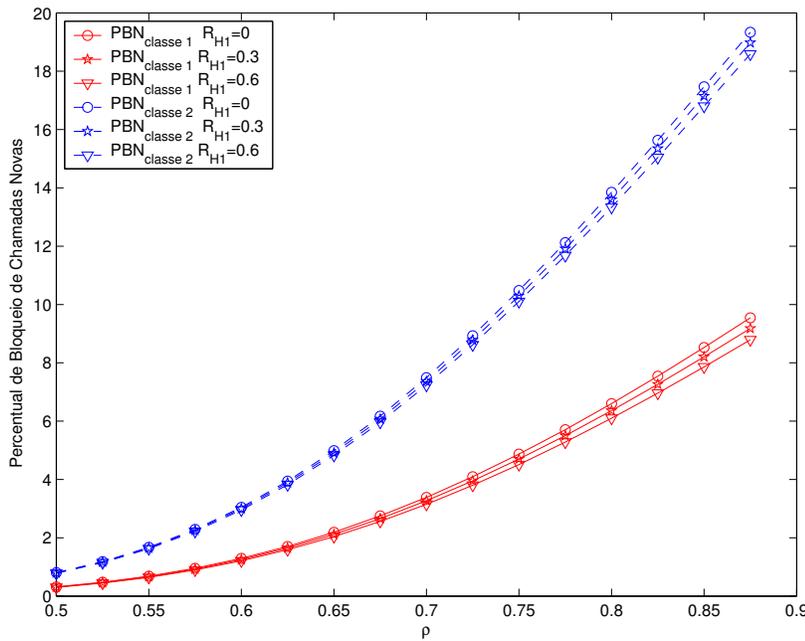


Figura 8.17: Percentual de bloqueio de chamadas novas das classes 1 e 2 versus intensidade de tráfego total normalizada,  $N_c = 30$ ,  $B_1 = 1$ ,  $B_2 = 2$ , para  $R = (0.7, 1, R_{H1}, 0)$  onde  $R_{H1}$  é igual a 0; 0.3 e 0.6.

Observa-se na figura 8.18 que as curvas relativas às falhas de *handoff* da classe 1,  $P_{FH1}$ , sofrem grande influência da restrição  $R_{H1}$ , enquanto que os outros três conjuntos de curvas  $P_{BN1}$ ,  $P_{BN2}$  e  $P_{FH2}$ , nas figuras 8.17 e 8.18, sofrem apenas uma pequena flutuação devida às mudanças nos valores das taxas de chegada.

Observando os resultados apresentados nas figuras 8.12, 8.13, 8.15, 8.16, 8.17, 8.18 e **conclui-se que qualquer alteração em cada uma das**

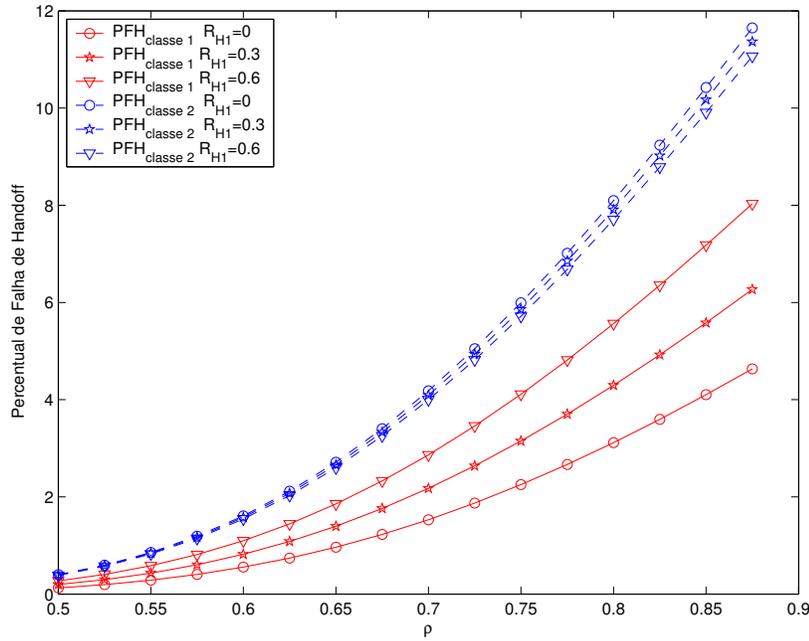


Figura 8.18: Percentual de falha de chamadas em *handoff* das classes 1 e 2 versus intensidade de tráfego total normalizada,  $N_c = 30$ ,  $B_1 = 1$ ,  $B_2 = 2$ , para  $R = (0.7, 1, R_{H1}, 0)$  onde  $R_{H1}$  é igual a 0; 0.3 e 0.6.

quatro restrições altera o valor dos quatro percentuais de bloqueio. Isto se deve ao fato de que cada vez que mudamos uma restrição, há mudança nas taxas de chegada que leva a uma solução diferente para as probabilidades estacionárias dos estados.

Outra observação interessante é que o percentual de bloqueio mais afetado se dá para a classe de usuário diretamente relacionada à restrição que teve seu valor modificado devido ao fato de que a mudança da restrição,  $R_{H\gamma}$  ou  $R_{N\gamma}$ , influencia no somatório de estados que levam ao bloqueio da chamada conforme as equações (8-41) e (8-44).

Além disto, é importante deixar claro que o efeito da restrição na própria classe é muito maior do que o seu efeito nas demais classes, conforme o esperado.

### Sistemas de Duas Classes de Usuários com Restrições Múltiplas e Requisitos de Bandas Iguais

Em um sistema real há usuários com necessidades diferentes de acesso aos recursos. As diferenças podem vir das características de tráfego, requisitos de qualidade de serviço ou simplesmente classes de tarifação

diferentes que podem ser tratadas pelos valores diferentes de restrição aos canais do sistema.

Para avaliar como as restrições aos recursos influenciam nas probabilidades de bloqueio, criam-se duas classes com necessidades de banda iguais, porém seus valores de restrição são diferentes. Dessa forma pretende-se conceder prioridade de uma classe em relação à outra.

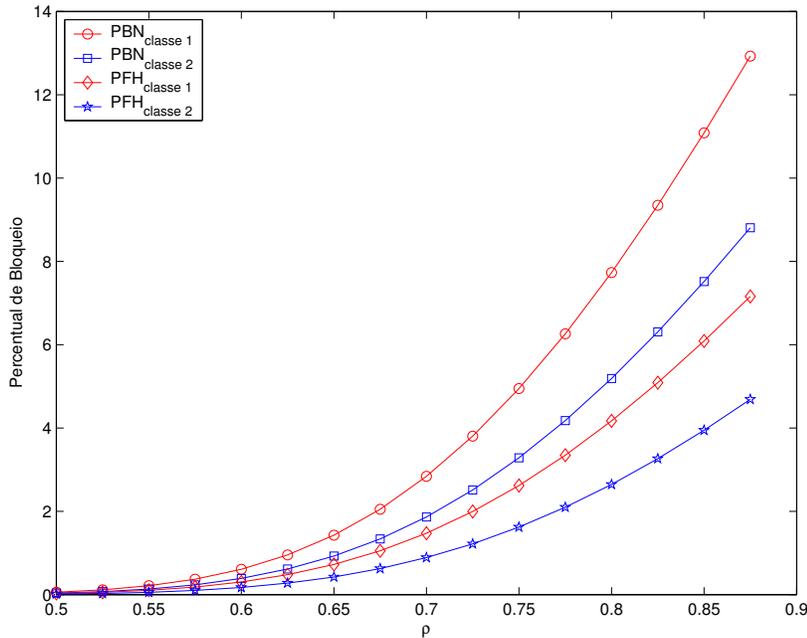


Figura 8.19: Percentual de bloqueio versus intensidade de tráfego total normalizada,  $N_c = 30$ ,  $\theta = 2$ ,  $B_1 = B_2 = 1$ ,  $R = (1, 0.5, 0.3, 0)$ .

Ambas as classes possuem requisito de banda,  $B_1 = B_2 = 1UB$ . A duração média da chamada é de 120s e as taxas de chegada de usuários são iguais. Portanto, as duas classes estão em condições idênticas, a menos dos valores de suas restrições.

As figuras 8.19, 8.20 e 8.21 apresentam os resultados analíticos obtidos em *MATLAB*®, para um sistema que possui duas classes de usuários e  $N_c = 30UB$ . A taxa de mobilidade é  $\theta = 2$ . As restrições são dadas pelo vetor  $R$ , dado por (8-58), onde  $R_{H1}$  assume os valores 0.3, 0.5 e 0.7, respectivamente.

$$R = (R_{N1}, R_{N2}, R_{H1}, R_{H2}) = (1, 0.5, R_{H1}, 0) \tag{8-58}$$

Observa-se que, como as classes possuem requisitos de banda iguais, os valores de seus bloqueios são dados diretamente pelos valores de suas restrições. Para confirmar esta idéia, na figura 8.20 a restrição dos usuários

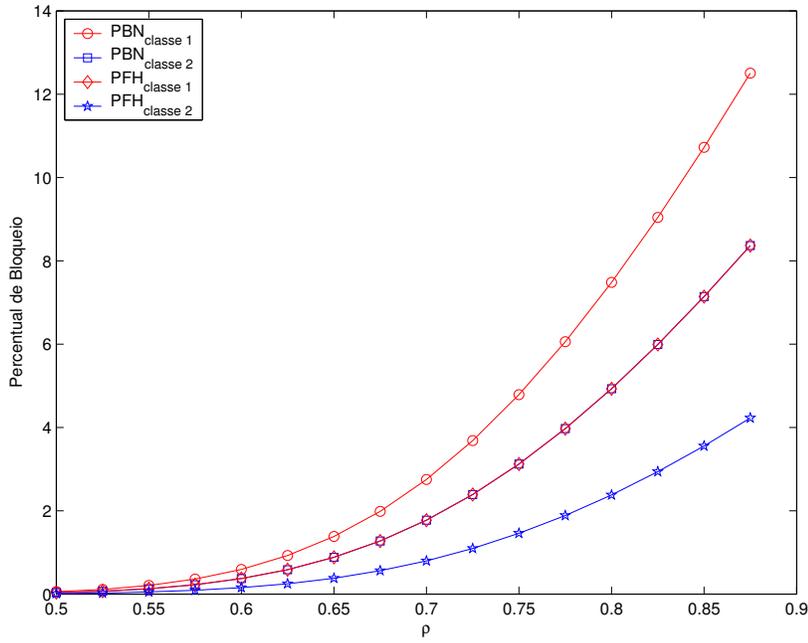


Figura 8.20: Percentual de bloqueio versus intensidade de tráfego total normalizada,  $N_c = 30$ ,  $\theta = 2$ ,  $B_1 = B_2 = 1$ ,  $R = (1, 0.5, 0.5, 0)$ .

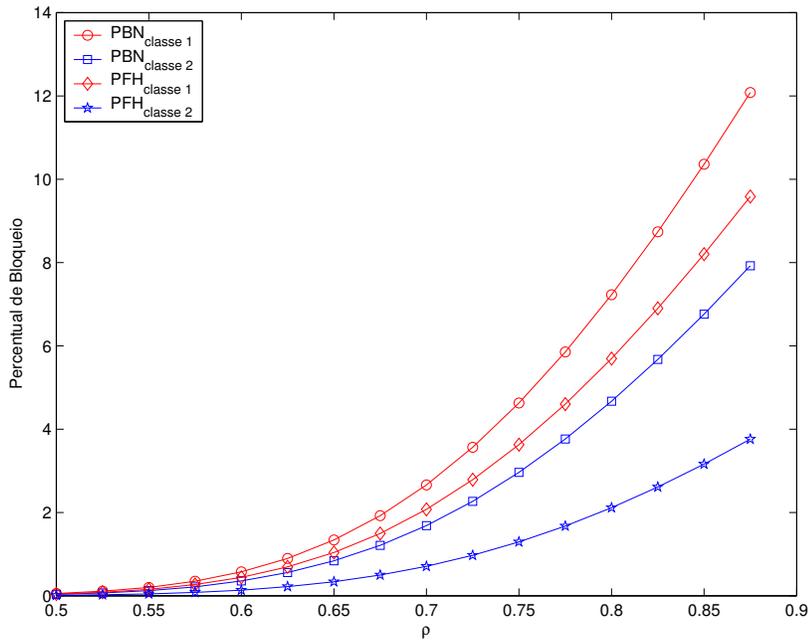


Figura 8.21: Percentual de bloqueio versus intensidade de tráfego total normalizada,  $N_c = 30$ ,  $\theta = 2$ ,  $B_1 = B_2 = 1$ ,  $R = (1, 0.5, 0.7, 0)$ .

em *handoff* da classe 1 é  $R_{H1}$  é igual a restrição dos usuários novos da classe e,  $R_{N2} = 0.5$ , observa-se que, neste caso, as curvas correspondentes,  $P_{FH1}$  e

$P_{BN2}$  são idênticas, conforme o esperado.

### 8.7.2

#### Resultados Analíticos para Sistemas de Três Classes de Usuários com Restrições Múltiplas

As figuras 8.22, 8.23 e 8.24 apresentam os resultados analíticos obtidos em  $MATLAB_{\text{©}}$ , para um sistema que possui três classes de usuários e um total de recursos,  $N_c = 30UB$ .

As três classes possuem taxas de chegada de usuários iguais. A Intensidade total de solicitação de recursos,  $\rho$ , é dada pela equação (8-49) e seu valor varia entre 0.5 e 0.9 no eixo das abscissas. A duração média da chamada é de 120s. A taxa de mobilidade,  $\theta = \frac{\lambda_H}{\lambda_N}$ , é constante e vale  $\theta = 2$ .

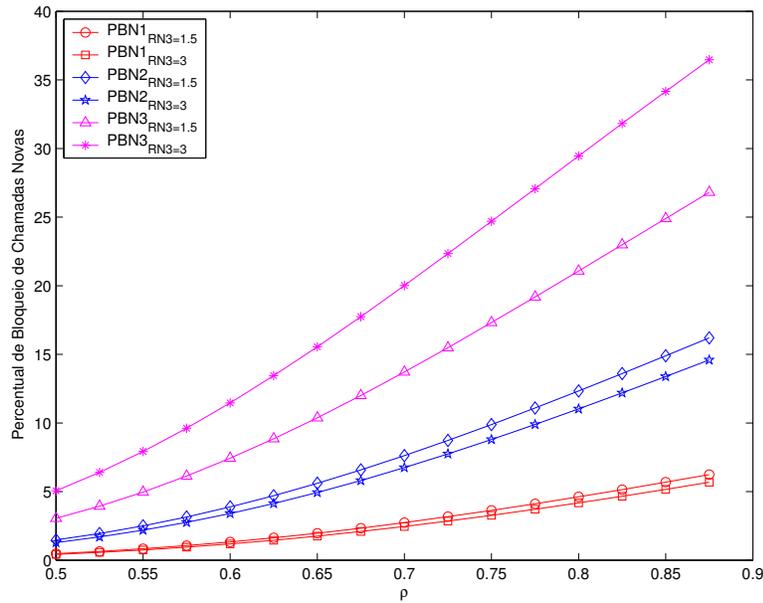


Figura 8.22: Percentual de bloqueio de chamadas novas versus intensidade de tráfego total normalizada,  $N_c = 30$ ,  $\theta = 2$ ,  $B_1 = 1$ ,  $B_2 = 2$ ,  $B_3 = 3$ ,  $R = (0.5, 1, R_{N3}, 0.2, 0.5, 0)$  onde  $R_{N3} = 1.5$  e  $3$ .

A classe 1 utiliza  $1UB$ , a classe 2 utiliza  $2UB$ , e a classe 3 utiliza  $3UB$ . Ou seja,  $B_1 = 1$ ,  $B_2 = 2$  e  $B_3 = 3$ . De três classes, temos seis tipos diferentes de usuário solicitando recursos do sistema: usuários novos,  $N1$ ,  $N2$  e  $N3$ ; e usuários em *handoff*,  $H1$ ,  $H2$  e  $H3$ . Para cada um dos seis tipos de usuário, há um valor diferente de restrição definido pelo vetor de restrição

$$R = (R_{N1}, R_{N2}, R_{N3}, R_{H1}, R_{H2}, R_{H3}) \tag{8-59}$$

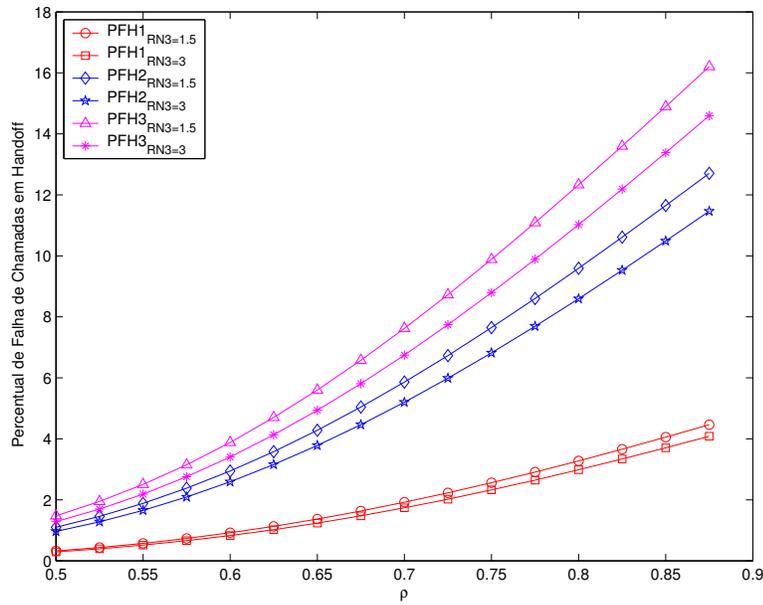


Figura 8.23: Percentual de falha de chamadas em *handoff* versus intensidade de tráfego total normalizada,  $N_c = 30$ ,  $\theta = 2$ ,  $B_1 = 1$ ,  $B_2 = 2$ ,  $B_3 = 3$ ,  $R = (0.5, 1, R_{N3}, 0.2, 0.5, 0)$  onde  $R_{N3} = 1.5$  e  $3$ .

As figuras 8.22, 8.23 e 8.24 foram obtidas considerando dois valores diferentes para a restrição dos usuários novos da classe 3,  $R_{N3}$  assume os valores 1.5 e 3. O vetor restrição é dado por  $R$ , definido em (8-60).

$$(R_{N1}, R_{N2}, R_{N3}, R_{H1}, R_{H2}, R_{H3}) = (0.5, 1.0, R_{N3}, 0.2, 0.5, 0) \quad (8-60)$$

Em relação à utilização total dos canais, observa-se em 8.24 que embora as duas curvas sejam próximas entre si, quanto maior a restrição de canais, menor a utilização. A curva de utilização total para  $R_{N3} = 3$  está abaixo da curva de  $R_{N3} = 1.5$ .

Observando os resultados apresentados nas figuras 8.22 e 8.23 conclui-se que qualquer alteração em cada uma das restrições altera o valor de todos os percentuais de bloqueio. Isso se deve ao fato de que cada vez que mudamos uma restrição, há mudança nas taxas de chegada que leva a uma solução diferente para as probabilidades estacionárias de todos estados do sistema. Além disso, observa-se que o percentual de bloqueio mais afetado se dá para a classe de usuário diretamente relacionada à restrição que teve seu valor modificado; uma vez que a mudança da restrição,  $R_{H\gamma}$  ou  $R_{N\gamma}$ , influencia no somatório de estados que levam ao bloqueio da chamada, conforme as equações (8-41) e (8-44). Este mesmo comportamento foi observado no caso de duas classes de usuários.

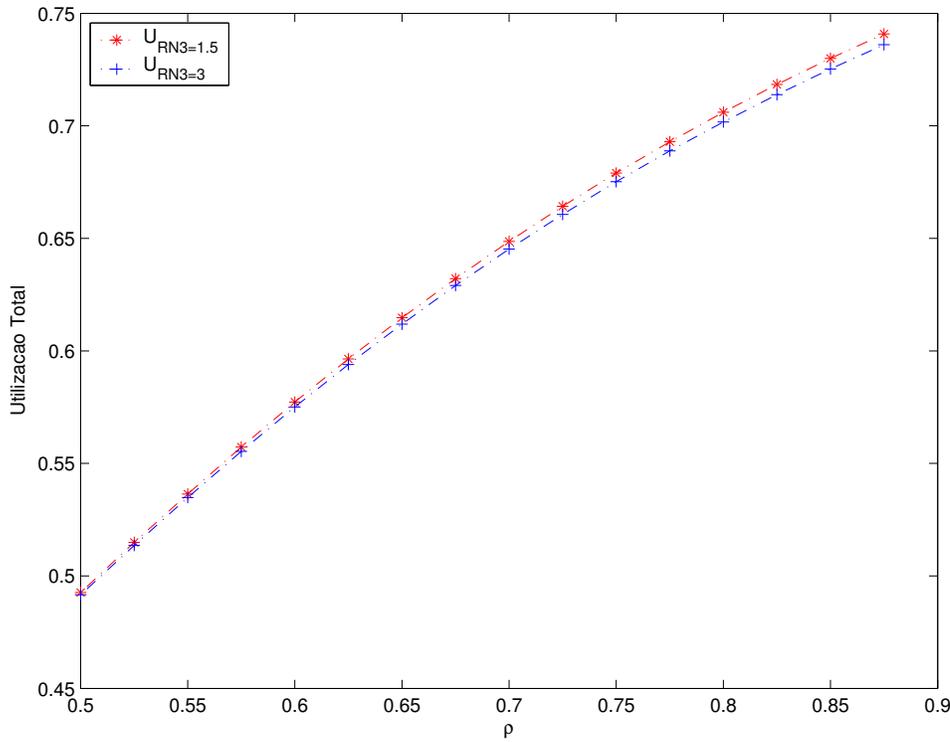


Figura 8.24: Utilização total versus intensidade de tráfego total normalizada,  $N_c = 30$ ,  $\theta = 2$ ,  $B_1 = 1$ ,  $B_2 = 2$ ,  $B_3 = 3$ ,  $R = (0.5, 1, R_{N3}, 0.2, 0.5, 0)$  onde  $R_{N3} = 1.5$  e  $3$ .

### 8.7.3 Resultados Analíticos para Sistemas de Quatro Classes de Usuários com Restrições Múltiplas

Neste caso, são oito tipos diferentes de usuário solicitando recursos do sistema: usuários novos,  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  e  $N_4$ ; e usuários em *handoff*,  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  e  $H_4$ . Para cada um dos oito tipos de usuário, há um valor diferente de restrição definido pelo vetor de restrição aos usuários dado por  $R$  definido em (8-61).

$$R = (R_{N_1}, R_{N_2}, R_{N_3}, R_{N_4}, R_{H_1}, R_{H_2}, R_{H_3}, R_{H_4}) \quad (8-61)$$

As figuras 8.25, 8.26 e 8.27 apresentam os resultados analíticos obtidos em *MATLAB*®, para um sistema que possui quatro classes de usuários e  $N_c = 15UB$ . As classes 1, 2, 3 e 4 utilizam: 1, 2, 3 e  $4UB$ , respectivamente. O vetor restrição definido em (8-62) para dois valores de restrição de usuários novos da classe 4,  $R_{N_4} = 1.3$  e  $R_{N_4} = 3$ . A taxa de mobilidade,  $\theta = \frac{\lambda_H}{\lambda_N}$ , é

constante e vale  $\theta = 2$ .

$$R = (0.7, 1, 3.5, R_{N4}, 0.2, 0.5, 1.2, 0) \tag{8-62}$$

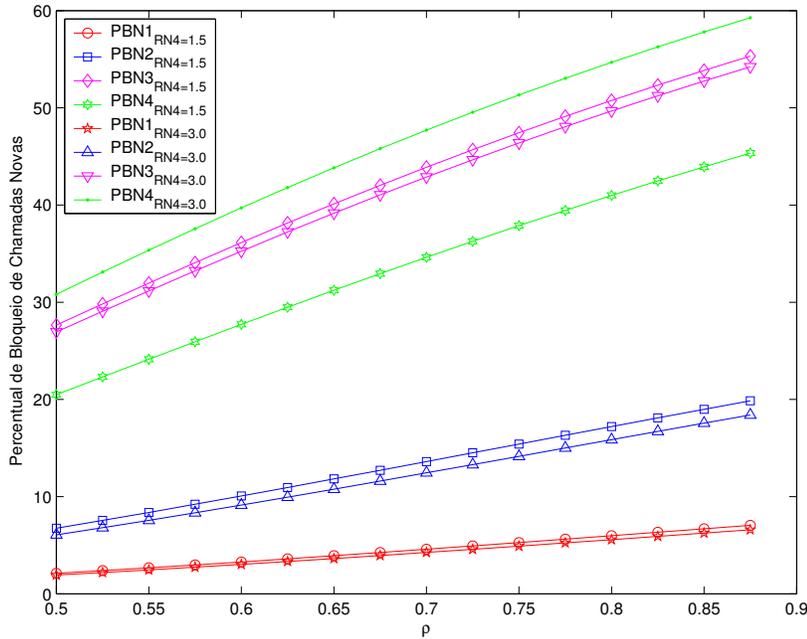


Figura 8.25: Percentual de bloqueio de chamadas novas versus intensidade de tráfego total normalizada,  $N_c = 15UB$ ,  $\theta = 2$ ,  $B_1 = 1$ ,  $B_2 = 2$ ,  $B_3 = 3$ ,  $B_4 = 4$ ,  $R = (0.7, 1, R_{N4}, 0.2, 0.5, 1.2, 0)$ , para  $R_{N4} = 1.3$  e  $R_{N4} = 3$ .

Na figura 8.25 observa-se que as duas curvas de percentual de bloqueio de usuários novos da classe 4 estão bastante afastadas entre si, enquanto que os outros pares de curvas de percentual de bloqueio das classes 1, 2 e 3 estão próximos. Portanto, o par de curvas que mais apresentou alteração com a variação da restrição  $R_{N4}$  é o par de  $P_{BN4}$ . Já na figura 8.26 referente ao percentual de falha de chamadas em *handoff* os quatro pares de curvas de  $P_{FH}$  mantêm-se relativamente próximos, apesar da variação da restrição  $R_{N4}$ . Este mesmo comportamento foi observado nos casos de 2 e 3 classes de usuários, onde se observa que sempre que há alguma variação das restrições, todas as probabilidades estacionárias dos estados da cadeia de Markov se modificam devido às modificações das taxas de chegada aos estados. Além disso, o percentual de bloqueio mais afetado pela variação é sempre aquele associado diretamente à restrição.

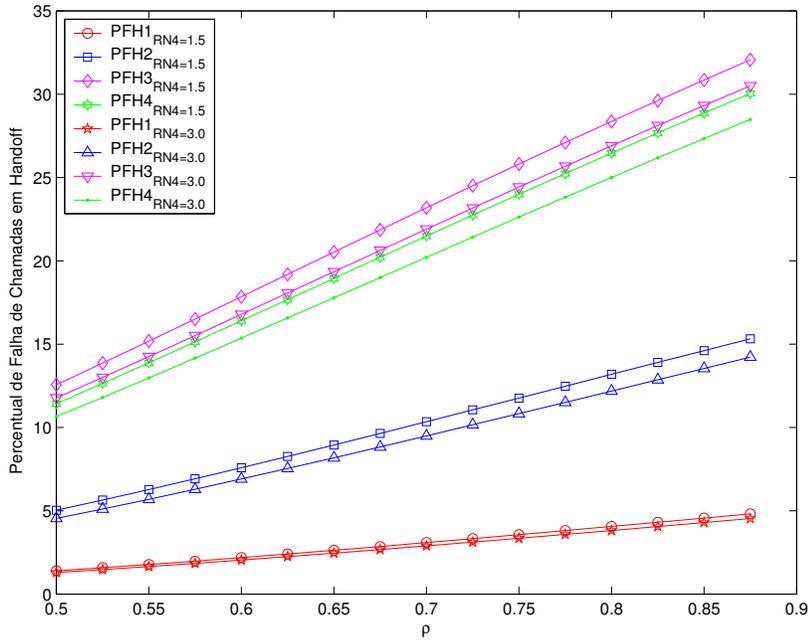


Figura 8.26: Percentual de falha de chamadas em *handoff* versus intensidade de tráfego total normalizada,  $N_c = 15UB$ ,  $\theta = 2$ ,  $B_1 = 1$ ,  $B_2 = 2$ ,  $B_3 = 3$ ,  $B_4 = 4$ ,  $R = (0.7, 1, R_{N4}, 0.2, 0.5, 1.2, 0)$ , para  $R_{N4} = 1.3$  e  $R_{N4} = 3$ .

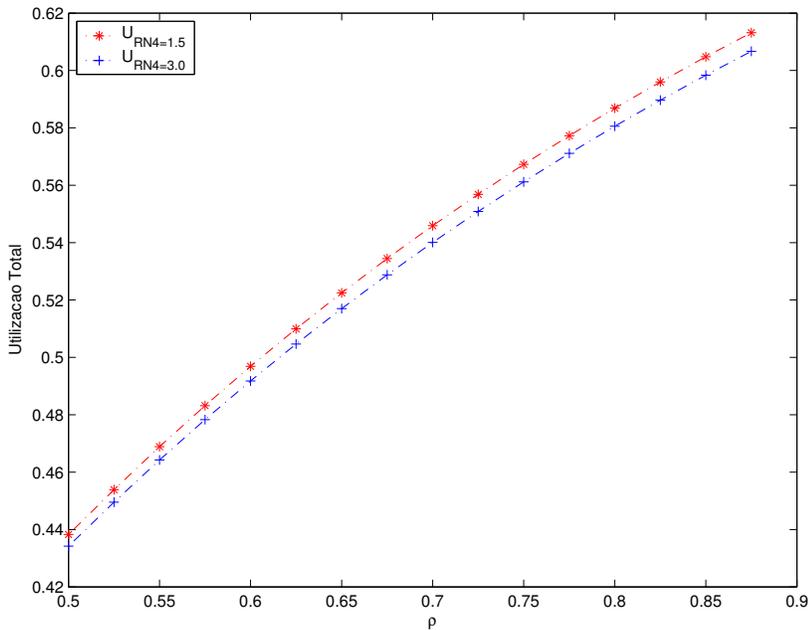


Figura 8.27: Utilização total versus intensidade de tráfego total normalizada,  $N_c = 15UB$ ,  $\theta = 2$ ,  $B_1 = 1$ ,  $B_2 = 2$ ,  $B_3 = 3$ ,  $B_4 = 4$ ,  $R = (0.7, 1, R_{N4}, 0.2, 0.5, 1.2, 0)$ , para  $R_{N4} = 1.3$  e  $R_{N4} = 3$ .

#### 8.7.4

#### Resultados Analíticos para Sistemas de Quatro Classes de Usuários com Restrições Múltiplas e Proporções Diferentes entre as Classes

As figuras 8.28, 8.29 e 8.30 apresentam os resultados analíticos obtidos em *MATLAB*<sub>©</sub>, para um sistema que possui quatro classes de usuários e  $N_c = 15UB$ .

Para cada uma das quatro classes, há um par de curvas. Uma das curvas do par corresponde ao caso de taxas de chegada de usuários iguais. Ou seja, proporções iguais de ocorrência das classes.

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \frac{\lambda}{4} \quad (8-63)$$

No segundo caso, foi considerado que 70% dos usuários são da classe 4 e 10% de cada uma das demais classes de usuários.

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0.1 \times \lambda \quad (8-64)$$

$$\lambda_4 = 0.7 \times \lambda \quad (8-65)$$

A classes utilizam,  $B_1 = 1$ ,  $B_2 = 2$ ,  $B_3 = 3$  e  $B_4 = 4$ . Temos oito tipos diferentes de usuário solicitando recursos do sistema: usuários novos,  $N1$ ,  $N2$ ,  $N3$  e  $N4$ ; e usuários em *handoff*,  $H1$ ,  $H2$ ,  $H3$  e  $H4$ . A taxa de mobilidade,  $\theta = \frac{\lambda_H}{\lambda_N}$ , é constante e vale  $\theta = 2$ . O vetor de restrição é dado por:

$$R = (0.7, 1, 3.5, 1.5, 0.2, 0.5, 1.2, 0) \quad (8-66)$$

Observa-se um resultado interessante nas figuras 8.28 e 8.29. Na figura 8.28 o percentual de bloqueio de chamadas novas da classe 4 inicialmente é o mesmo mesmo para proporções diferentes e **diverge** conforme a intensidade de tráfego aumenta. Já o percentual de falha de chamadas em *handoff* das classe 3 e 4 tende uma **suave convergência** conforme aumenta a intensidade de tráfego, na figura 8.29.

Quando observamos as modificações na utilização dos recursos do sistema na figura 8.30, notamos que a utilização para o caso de 70% da classe 4 é bem menor que no caso de proporções iguais, uma vez que a classe 4 é justamente aquela que solicita mais recursos do sistema, ocasionando maiores percentuais de bloqueio e conseqüentemente de recursos não utilizados.

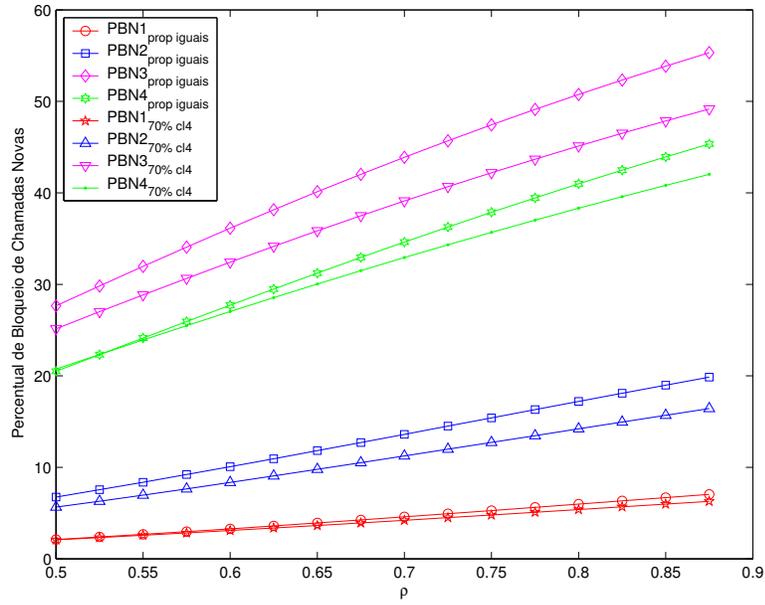


Figura 8.28: Percentual de bloqueio de chamadas novas versus intensidade de tráfego total normalizada,  $\theta = 2, N_c = 15UB, B_1 = 1, B_2 = 2, B_3 = 3, B_4 = 4, R = (0.7, 1, 3.5, 1.5, 0.2, 0.5, 1.2, 0)$ , para proporções entre as classes iguais no primeiro caso e de 70% da classe 4 no segundo caso.

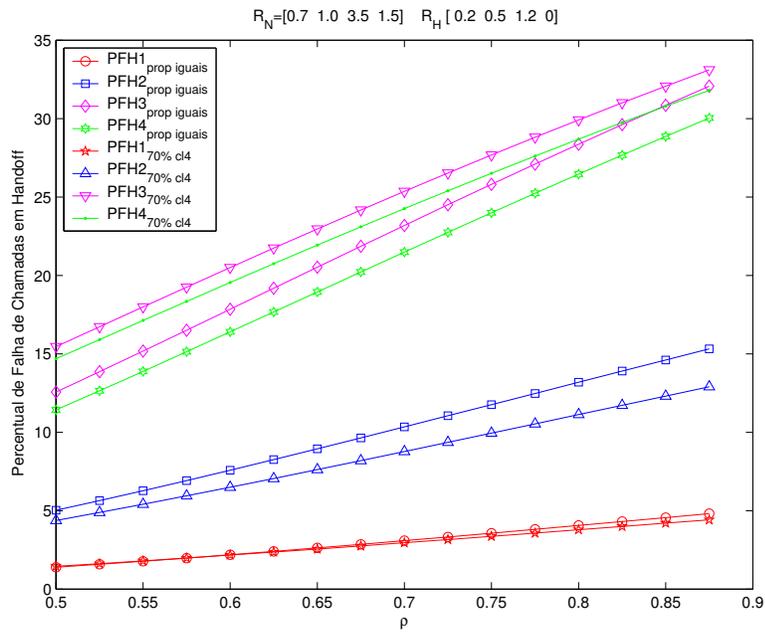


Figura 8.29: Percentual de falha de chamadas em *handoff* versus intensidade de tráfego total normalizada,  $\theta = 2, N_c = 15UB, B_1 = 1, B_2 = 2, B_3 = 3, B_4 = 4, R = (0.7, 1, 3.5, 1.5, 0.2, 0.5, 1.2, 0)$ , para proporções entre as classes iguais no primeiro caso e de 70% da classe 4 no segundo caso.

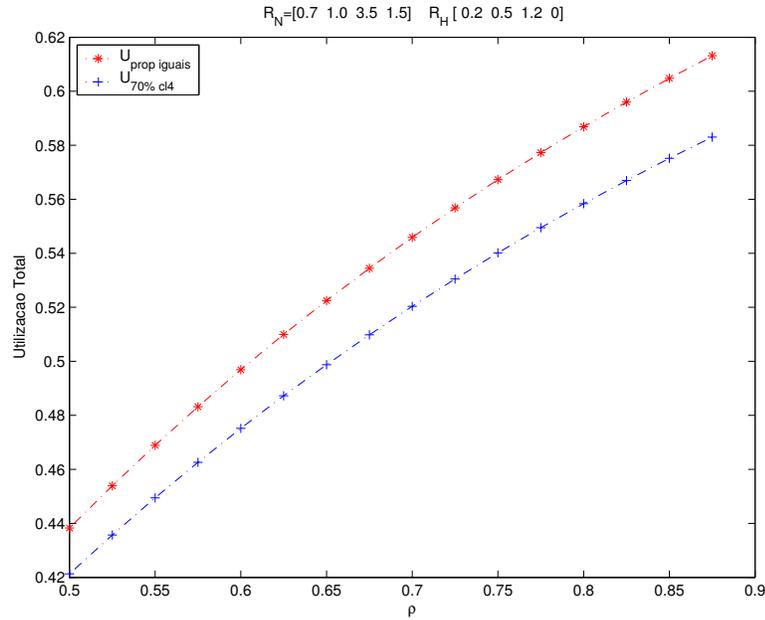


Figura 8.30: Utilização total versus intensidade de tráfego total normalizada,  $\theta = 2, N_c = 15UB, B_1 = 1, B_2 = 2, B_3 = 3, B_4 = 4, R = (0.7, 1, 3.5, 1.5, 0.2, 0.5, 1.2, 0)$ , para proporções entre as classes iguais no primeiro caso e de 70% da classe 4 no segundo caso.

**8.7.5  
Conclusão**

O modelo analítico apresentado neste capítulo para o caso de M classes generaliza o caso anterior de uma classe ( $M = 1$ ).

Observando os resultados apresentados nas figuras 8.25, 8.26 e 8.27 para 4 classes de usuários e, comparando-os com os resultados de 2 e 3 classes, conclui-se que para qualquer quantidade de classes de usuários, uma alteração em cada uma das restrições altera o valor de todos percentuais de bloqueio. Isso se deve ao fato de que as taxas de chegada dependem das restrições e que qualquer alteração no conjunto de restrições leva a uma solução diferente para as probabilidades estacionárias de todos os estados da cadeia de Markov.

Observa-se também, que o percentual de bloqueio mais afetado se dá para a classe de usuário diretamente relacionada à restrição que teve seu valor modificado. Este efeito se deve ao fato de que a mudança da restrição,  $R_{H\gamma}$  ou  $R_{N\gamma}$ , influencia no somatório de estados que levam ao bloqueio da chamada conforme as equações (8-41) e (8-44).

Além do vetor restrição  $R$ , os bloqueios de cada classe estão relacionados à banda requerida por cada classe,  $B_\gamma$ , e ao percentual de usuários de

cada classe. De uma maneira geral, classes com requisição de banda maior tendem a ter maiores bloqueios que aquelas que requerem bandas menores.

Concluimos que o bloqueio é uma combinação de todos estes fatores: Vetor Restrição  $R$ , requisição de banda  $B_\gamma$  e percentual de usuários de cada classe.

Em relação à utilização total dos canais observa-se em 8.27 que quanto maior a restrição de canais, menor a utilização.

Outra observação interessante é que o valor de cada uma das 2M restrições pode ser modificado de forma a favorecer uma ou outra classe, incluindo os usuários novos e os usuários em *handoff*.