

5 Resultados

A dificuldade em modelar analiticamente o comportamento de sistemas celulares hierarquizados faz com que grande parte dos estudos de desempenho destes sistemas seja baseada em simulações.

Neste capítulo são apresentados os resultados de simulações¹ efetuadas na ferramenta descrita no capítulo anterior. Nessas simulações pretendeu-se comparar e analisar os esquemas de *handoff* para sistemas celulares hierarquizados apresentados na dissertação. Além disso, pretendeu-se também analisar o comportamento do sistema para diversas distribuições de canais entre micro e macro-células investigando a possibilidade de uma distribuição ótima de canais entre as camadas de acordo com o perfil de tráfego do problema. As métricas de desempenho descritas no capítulo 4 permitiram realizar as comparações entre as estratégias.

¹Os resultados apresentados foram obtidos com 1 rodada do simulador.

5.1 Parâmetros Fixos

Durante as simulações, os seguintes parâmetros do simulador mostrados na tabela 5.1 e 5.2 foram mantidos fixos.

Tabela 5.1 Parâmetros para o Simulador: Dados do Modelo de Propagação

Distância entre ERBs (Km)	1
Distância entre micro-ERBs (Km)	0.328
Distância entre blocos de prédios (m)	170
Potência transmitida pela macro-ERB (dBm)	43.7
Potência transmitida pela micro-ERB (dBm)	28
Ganho da Antena da macro-ERB (dBi)	18
Ganho da Antena da micro-ERB (dBi)	17
Altura da antena da macro-ERB (m)	40
Altura da antena da micro-ERB (m)	15
Largura da rua (m)	30
Frequência (MHz)	900
Altura da antena do móvel (m)	1.5
Altura dos prédios (m)	20
Tipo de Cidade	Cidade Grande

Tabela 5.2 Outros Parâmetros do Simulador

Razão C/I_{acesso} (dB)	18
Razão C/I_{TF} (dB)	12
Razão $C/I_{handoff}$ (dB)	15
Ganho de Diversidade (dB)	3.5
Limite de tentativas de <i>handoff</i>	1

5.2

Dados de Entrada Variados Durante as Simulações

Nas tabelas 5.3, 5.4 e 5.5 estão os valores utilizados dos parâmetros variáveis durante as simulações

Tabela 5.3 Parâmetros de tráfego

Taxa de Geração de Chamadas (h^{-1})	100, 200, 300, 400
Duração média das Chamadas (min)	2
Duração da Simulação (h)	4, 2, 4/3, 1

A taxa de geração de chamadas é computada para a região de cobertura de uma micro-célula. Portanto, levando em conta a janela de simulação, aproximadamente 20000 chamadas foram geradas em todos os casos.

Tabela 5.4 Parâmetros das macro e micro-ERBs

Número de Canais nas Micro-células	Número de Canais por setor nas Macro-células	Número Total de canais na camada nas Micro-células	Número Total de Canais nas Macro-células	Número Total de canais no Sistema
18	14	126	294	420
15	15	105	315	420
12	16	84	336	420
9	17	63	357	420
6	18	42	380	420
0	20	0	420	420

Tabela 5.5 Parâmetros de Mobilidade

Probabilidade de usuários pedestres	0.5, 0.75
Probabilidade de usuários veiculares	0.5, 0.25

As estratégias de *handoff* simuladas neste trabalho foram:

- Estratégia da Velocidade;
- Estratégia Clássica Reversível;
- Estratégia Clássica Não-Reversível.

Nos gráficos e comentários a seguinte notação foi adotada:

$xmyM$, onde x é o número de canais por micro-célula e y é o número de canais por setor de macro-célula

5.3 Estratégia Clássica Reversível

Na figura 5.1, analisa-se a influência do tráfego de entrada no número médio de usuários ativos no sistema para uma situação em que o número de chamadas geradas por usuários pedestres foi igual ao número de chamadas geradas por usuários veiculares. Observa-se que à medida em que se aumentou o tráfego, aumentou também o número de usuários sendo atendidos no sistema. Porém a partir de um certo valor, o gráfico tende a apresentar uma saturação ligada ao aumento da probabilidade de bloqueio de novos usuários. Também nota-se que o maior número de usuários atendidos, à medida em que o tráfego foi aumentando, deu-se para a divisão de canais 12m16M.

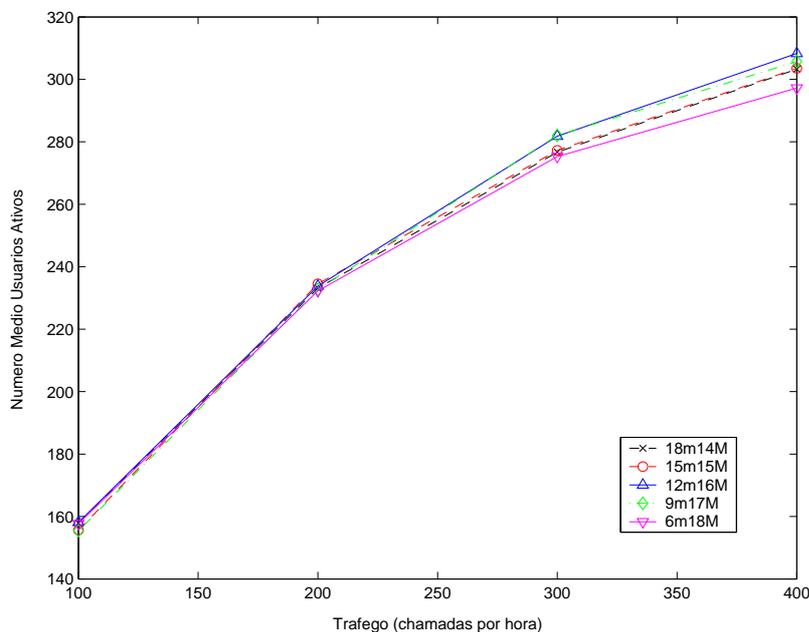


Figura 5.1 Número médio de usuários ativos em função do tráfego de entrada (50,50)

As figuras 5.2, 5.3 e 5.4 explicam estes resultados. Na figura 5.2, a probabilidade de bloqueio de usuários pedestres, para a distribuição acima mencionada, apresentou um resultado tolerável até mesmo para tráfegos altos. Já na figura 5.3, que apresenta a probabilidade de bloqueio de usuários veiculares, pode-se ver que para tráfegos baixos, a distribuição 6m18M apresentou melhor desempenho já que praticamente não houve bloqueio de pedestres nas micro-células o que evitou uma sobrecarga nas macro-células. Na medida em que o tráfego aumentou a distribuição 6m18M não mais apresentou o melhor resultado, uma vez que muitos pedestres bloqueados nas micro-células disputaram canais nas macro-células com usuários veiculares, aumentando assim a probabilidade de bloqueio dos veículos. Com isto observa-se que mais canais precisaram ser alocados nas micro-células para evitar o transbordo ex-

cessivo de usuários pedestres. Para tráfegos médios e altos, as distribuições 9m17M e 12m16M apresentaram melhor desempenho tendo em vista que além do transbordo dos usuários pedestres ter sido reduzido, ainda havia canais nas macro-células suficientes para comportar a demanda dos usuários veiculares.

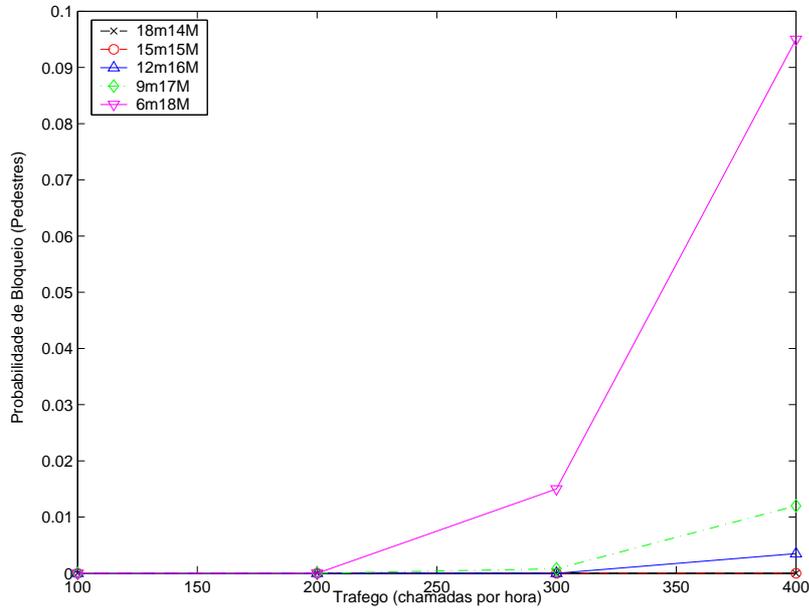


Figura 5.2 Probabilidade de bloqueio de usuários pedestres em função do tráfego de entrada (50,50)

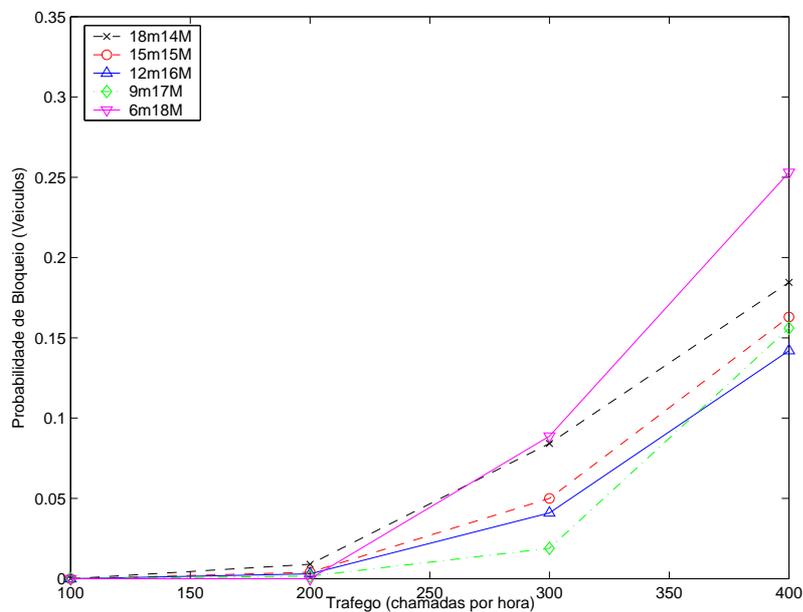


Figura 5.3 Probabilidade de bloqueio de usuários veiculares em função do tráfego de entrada (50,50)

Portanto, na média, (figura 5.4), as distribuições 6m18M, 9m17M e 12m16M apresentaram melhor desempenho para tráfegos baixos, médios e altos respectivamente.

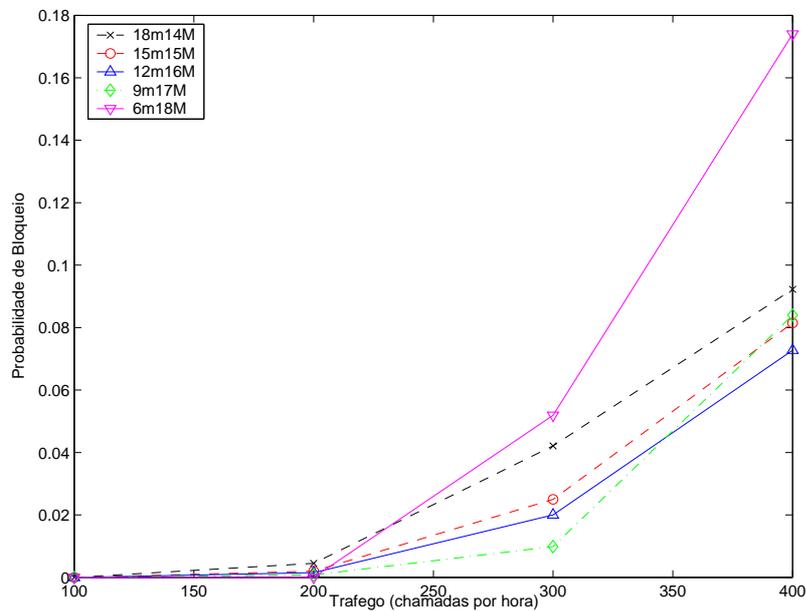


Figura 5.4 Probabilidade de bloqueio de usuários em função do tráfego de entrada (50,50)

É interessante notar, que no caso em que 75% das chamadas foram geradas por usuários pedestres, a partição do espectro que apresentou maior capacidade foi a 18m14M como mostra a figura 5.5.

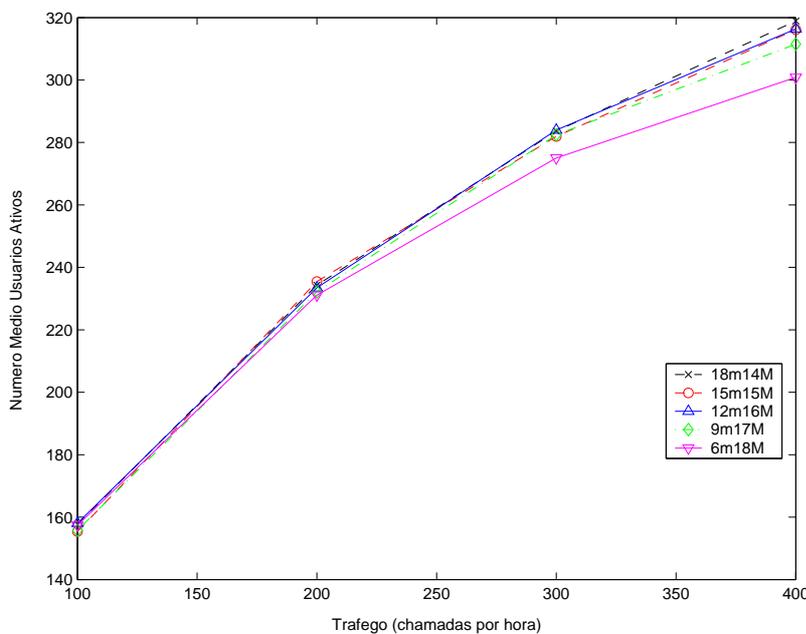


Figura 5.5 Número médio de usuários ativos em função do tráfego de entrada (75,25)

Isto pode ser explicado pelo fato de que quanto mais usuários pedestres, maior foi o número de canais necessários nas micro-células para reduzir a probabilidade de bloqueio, como mostra a figura 5.6. Quanto aos usuários veiculares, o resultado na figura 5.7 é bastante interessante, já que a configuração 18m14M apresentou menor probabilidade de bloqueio. Isto deveu-se ao fato de que quanto menor o número de canais nas micro-células maior a quantidade de usuários pedestres transbordados às macro-células o que implica um aumento significativo da probabilidade de bloqueio de chamadas de usuários veiculares, demonstrado pelo comportamento da distribuição 6m18M à medida que o tráfego aumentou. Portanto, para um perfil de tráfego com mais pedestres do que veículos, um maior número de canais deve ser alocado nas micro-células conforme o aumento do tráfego de entrada. A figura 5.8 mostra que a probabilidade média de bloqueio foi menor para a configuração 18m14M.

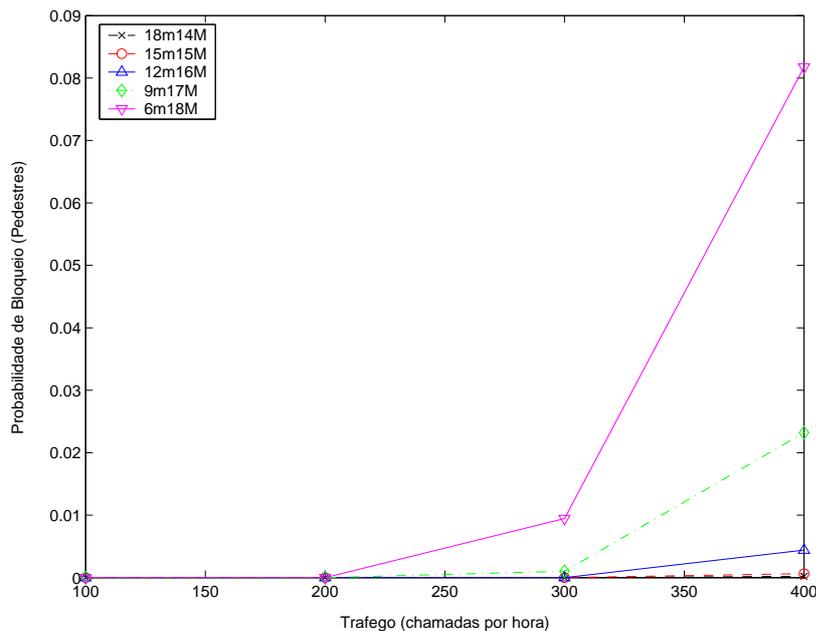


Figura 5.6 Probabilidade de bloqueio de usuários pedestres em função do tráfego de entrada (75,25)

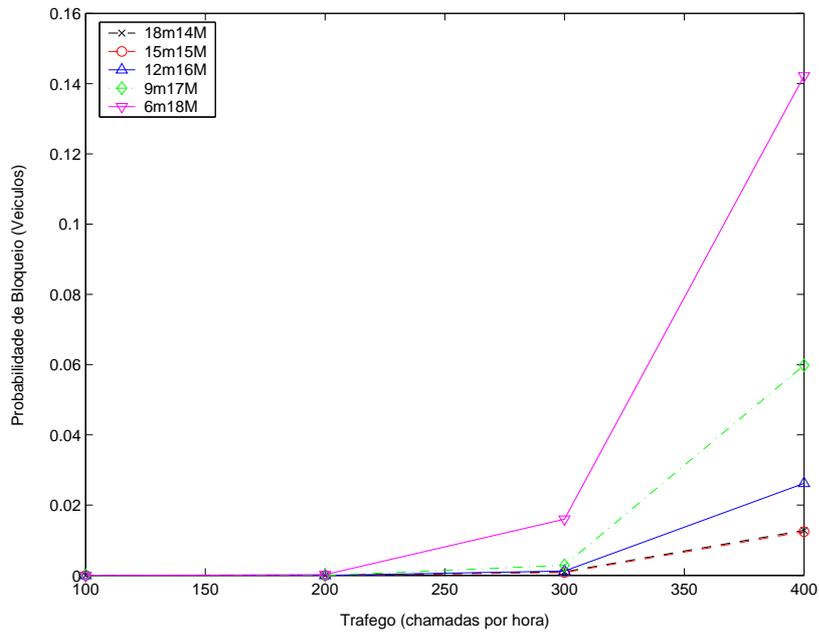


Figura 5.7 Probabilidade de bloqueio de usuários veiculares em função do tráfego de entrada (75,25)

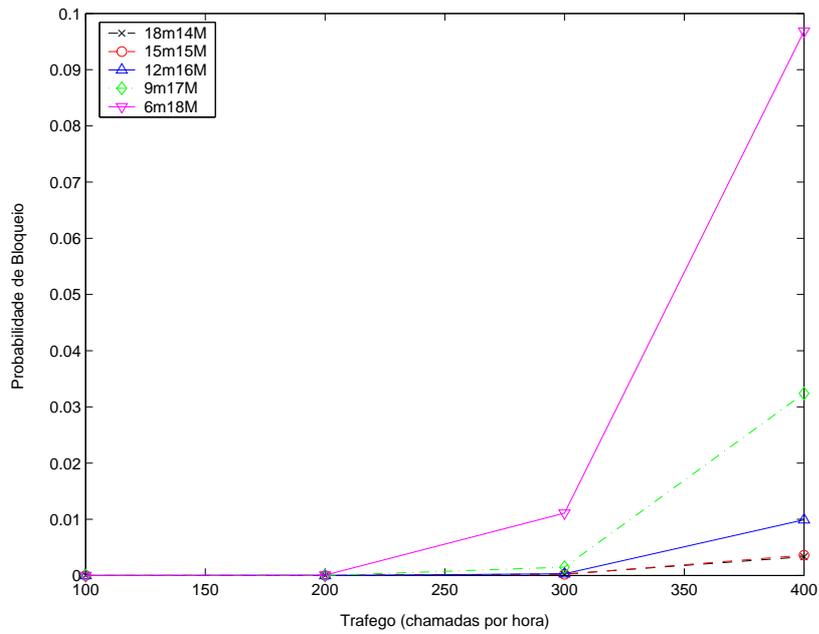


Figura 5.8 Probabilidade de bloqueio de usuários em função do tráfego de entrada (75,25)

5.4 Estratégia Clássica Não-Reversível

Os resultados para a estratégia clássica não-reversível aproximaram-se dos da estratégia clássica reversível. Para o caso em que o número de usuários pedestres foi igual ao número de usuários veiculares, a número médio de usuários ativos no sistema foi maior para uma configuração 12m16M como mostra a figura 5.9.

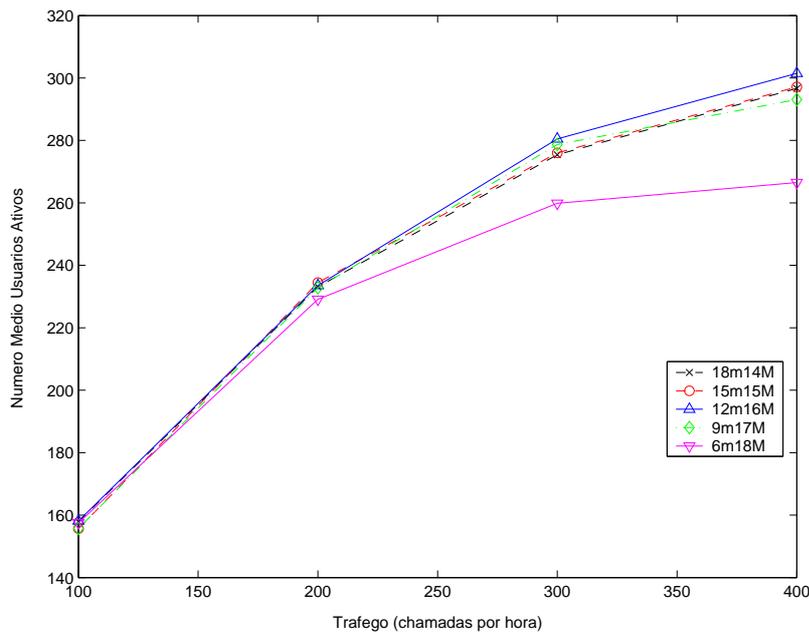


Figura 5.9 Número médio de usuários ativos em função do tráfego de entrada (50,50)

Novamente o comportamento da curva da figura acima pode ser explicado pela probabilidade de bloqueio de novos usuários. Nas figuras 5.10 e 5.11 são mostradas as probabilidades de bloqueio de novos usuários pedestres e veiculares. Da mesma forma que no caso reversível, para os usuários pedestres, a configuração 18m14M apresentou menor probabilidade de bloqueio e a configuração 12m16M apresentou resultados toleráveis. Para tráfegos altos as configurações com poucos canais nas micro-células, 6m18M e 9m17M, apresentaram elevada probabilidade de bloqueio. No caso de usuários veiculares, a configuração 9m17M apresentou melhores resultados do que a 12m16M, uma vez que na estratégia clássica não-reversível existe uma necessidade maior de canais nas macro-células. Isto é acarretado pelo fato de não haver retorno dos pedestres às micro-células.

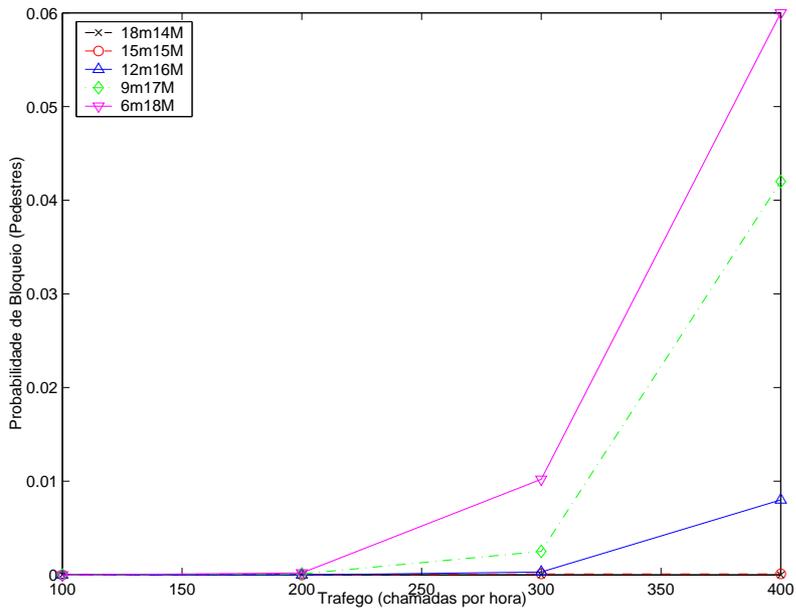


Figura 5.10 Probabilidade de bloqueio de usuários pedestres em função do tráfego de entrada (50,50)

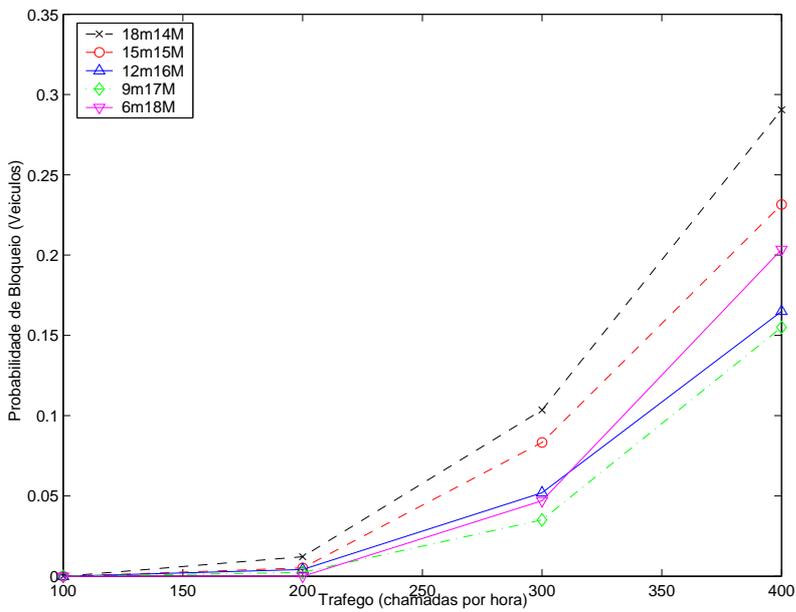


Figura 5.11 Probabilidade de bloqueio de usuários veiculares em função do tráfego de entrada (50,50)

Na média, a probabilidade de bloqueio, mostrada na figura 5.12, apresentou melhores resultados para a configuração 6m18M em tráfegos baixos, para a configuração 9m17M em tráfegos médios e para a configuração 12m16M para tráfegos altos.

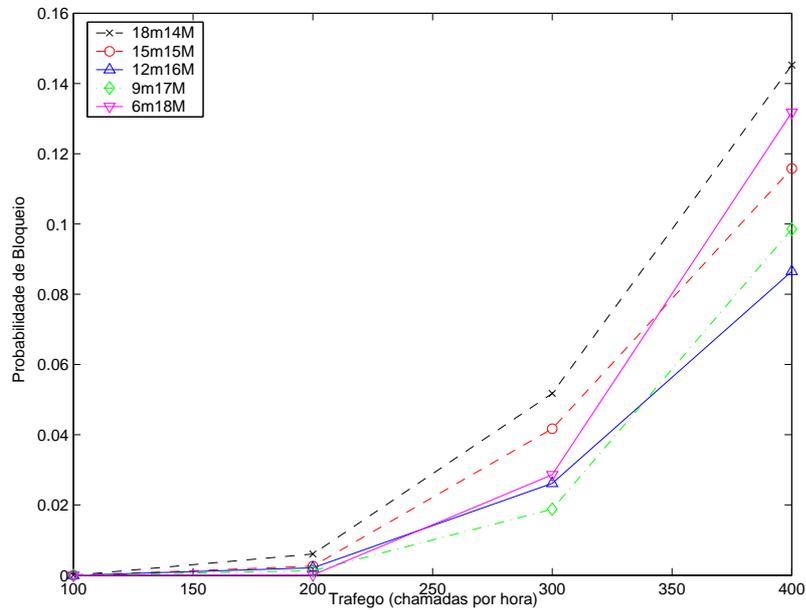


Figura 5.12 Probabilidade de bloqueio de usuários em função do tráfego de entrada (50,50)

No caso em que 75% das chamadas foram geradas por usuários pedestres, a partição do espectro que comportou um maior número de usuários foi o 18m14M como mostra a figura 5.13.

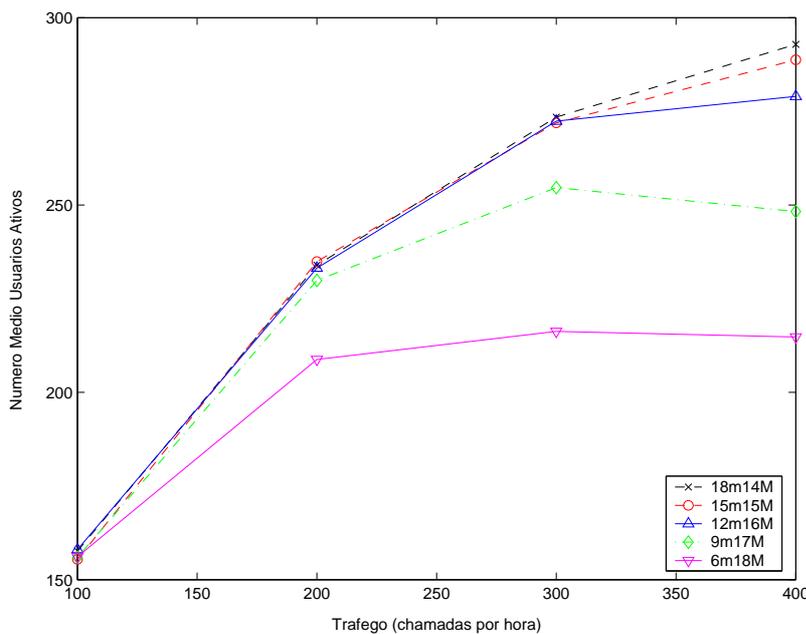


Figura 5.13 Número médio de usuários ativos em função do tráfego de entrada (75,25)

Da mesma forma que na estratégia clássica reversível, o comportamento da probabilidade de bloqueio explica a figura acima. As figuras 5.14 e 5.15 mostram a probabilidade de bloqueio dos usuários pedestres e veiculares em função do tráfego de entrada.

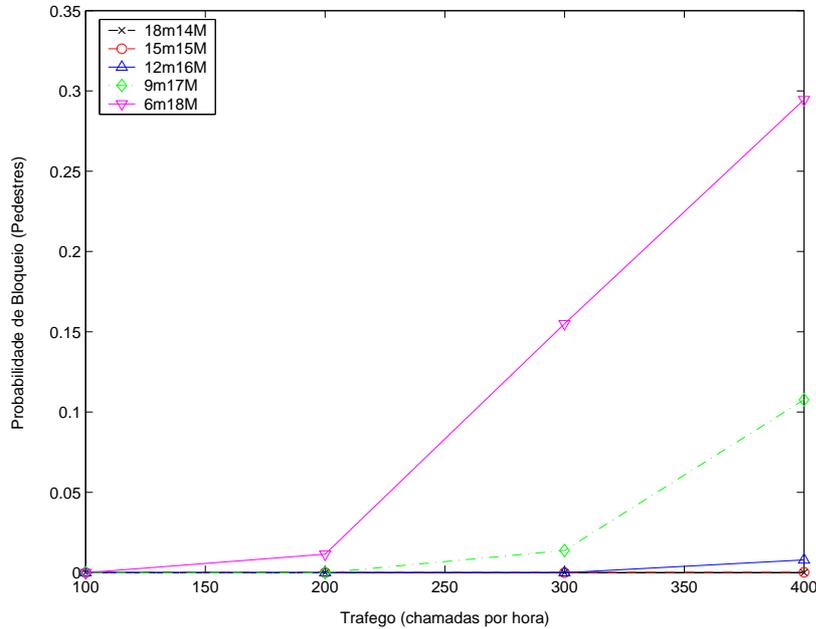


Figura 5.14 Probabilidade de bloqueio de usuários pedestres em função do tráfego de entrada (75,25)

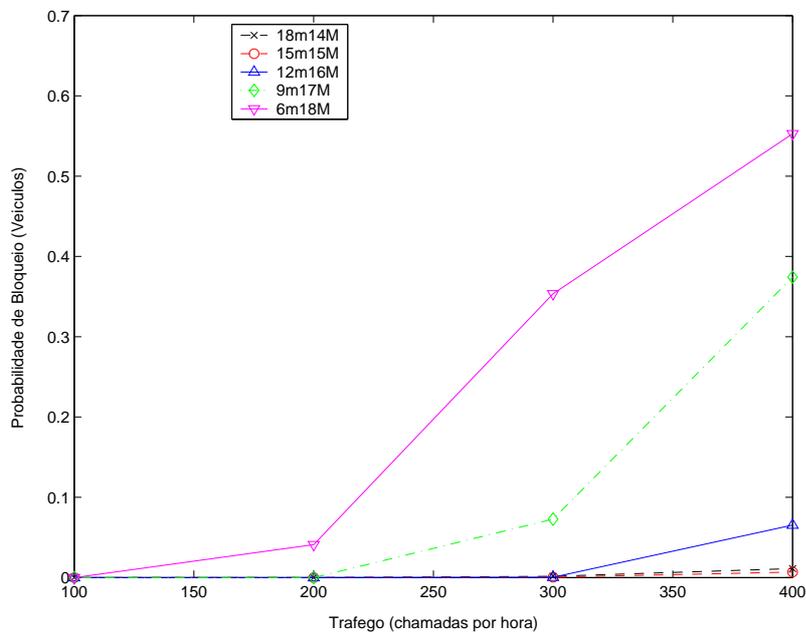


Figura 5.15 Probabilidade de bloqueio de usuários veiculares em função do tráfego de entrada (75,25)

A configuração 18m14M apresentou menor probabilidade de bloqueio tanto para usuários pedestres quanto para usuários veiculares. O fato de haver um

maior número de canais nas micro-células diminuiu o transbordo de usuários pedestres para as macro-células, conseqüentemente o tráfego de entrada nas macro-células foi menor, o que diminuiu a probabilidade de bloqueio de ambas as classes de usuários. A figura 5.16 mostra a probabilidade de bloqueio média.

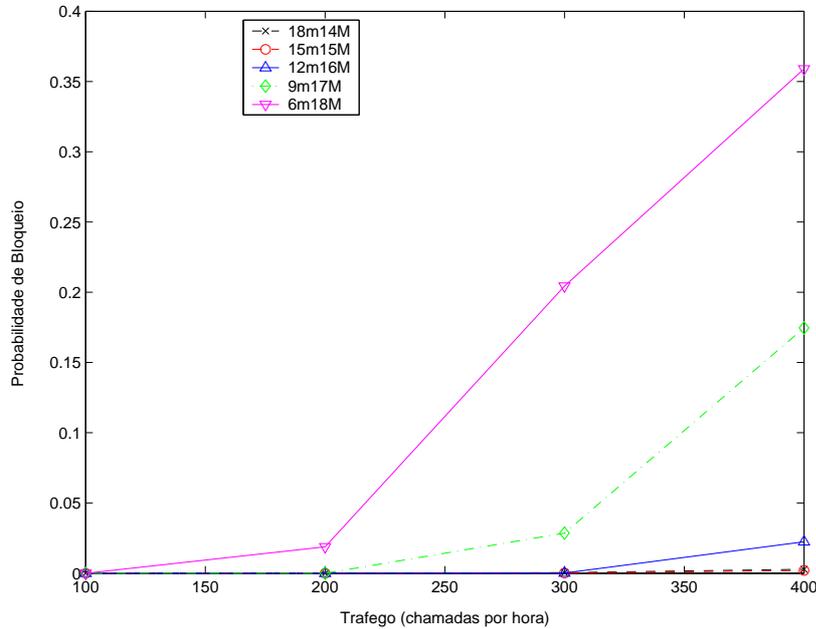


Figura 5.16 Probabilidade de bloqueio de usuários em função do tráfego de entrada (75,25)

5.5 Estratégia da Velocidade

A estratégia da velocidade apresentou um comportamento próximo aos das estratégias clássica reversível e não-reversível, ou seja, quando o número de chamadas geradas por cada classe de usuário foi o mesmo, a divisão de canais 12m16M apresentou maior capacidade a medida em que o tráfego gerado foi aumentando. Isto pode visto na figura 5.17.

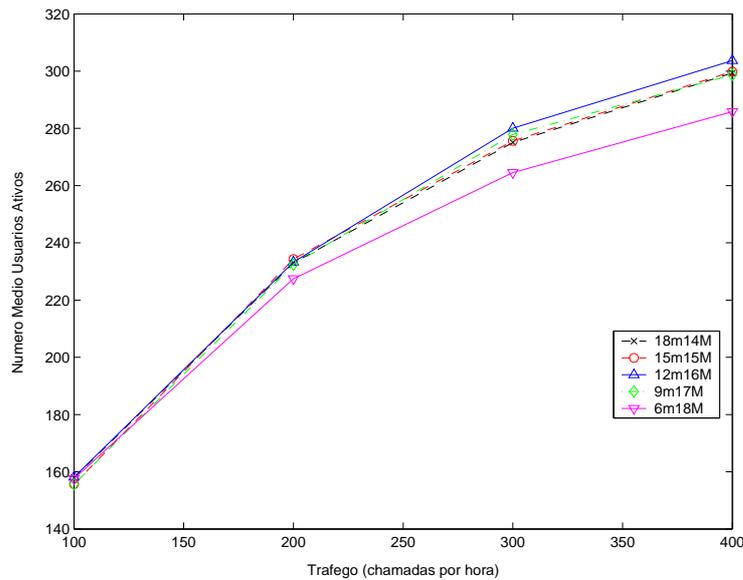


Figura 5.17 Número médio de usuários ativos em função do tráfego de entrada (50,50)

As razões para isto podem ser encontradas analisando-se a probabilidade de bloqueio. Novamente no caso de usuários pedestres e veiculares, figuras 5.18 e 5.19, a configuração 12m16M apresentou um resultado razoável (2% e 13%, respectivamente), enquanto que a configuração 18m14M apresentou probabilidade de bloqueio zero para pedestres e de aproximadamente 20% para veículos. Note-se que o comportamento da probabilidade de bloqueio nesta estratégia poderia ser previsto pela teoria de tráfego, já que não há transbordo para as macro-células de usuários pedestres bloqueados nas micro-células.

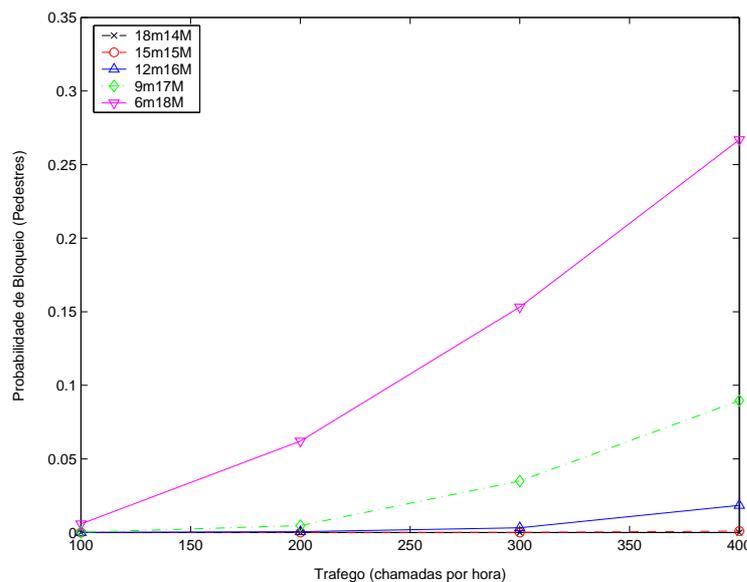


Figura 5.18 Probabilidade de bloqueio de usuários pedestres em função do tráfego de entrada (50,50)

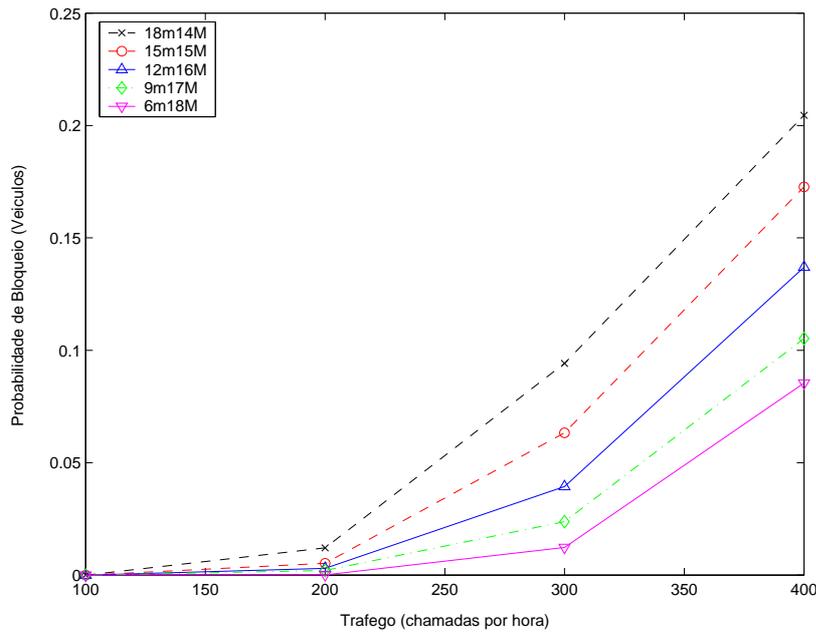


Figura 5.19 Probabilidade de bloqueio de usuários veiculares em função do tráfego de entrada (50,50)

Portanto, na média (figura 5.20), a configuração 12m16M apresentou menor probabilidade de bloqueio.

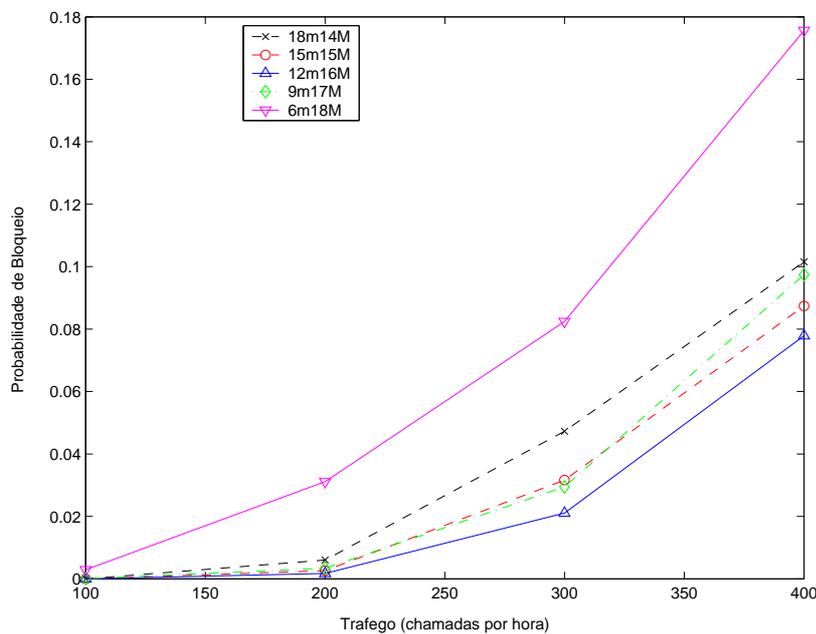


Figura 5.20 Probabilidade de bloqueio de usuários em função do tráfego de entrada (50,50)

No cenário em que 75% das chamadas foram geradas por usuários pedestres, novamente, como na estratégia clássica reversível a partição do espectro que apresentou maior capacidade foi o 18m14M como mostra a figura 5.21.

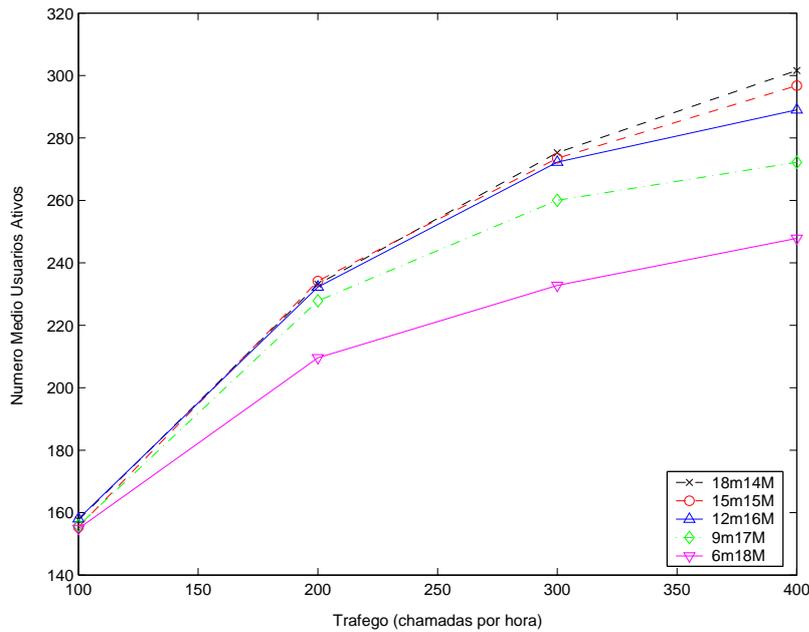


Figura 5.21 Número médio de usuários ativos em função do tráfego de entrada (75,25)

O comportamento da probabilidade de bloqueio dos novos usuários explica os resultados. Apesar de a configuração 18m14M ter apresentado a maior de probabilidade de bloqueio para usuários veiculares (figura 5.22), o seu desempenho para usuários pedestres (figura 5.23) foi determinante para que a sua probabilidade de bloqueio média fosse a menor de todas, conforme a figura 5.24.

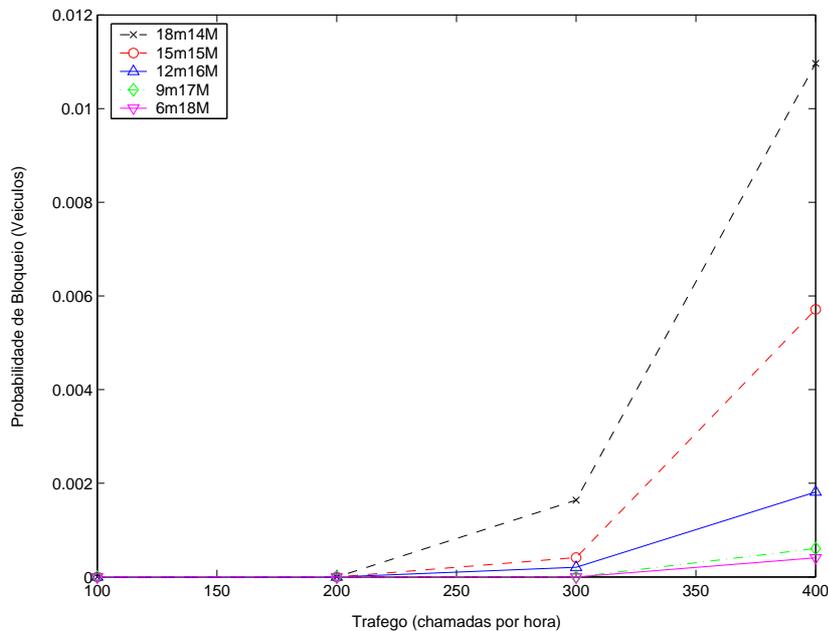


Figura 5.22 Probabilidade de bloqueio de usuários veiculares em função do tráfego de entrada (75,25)

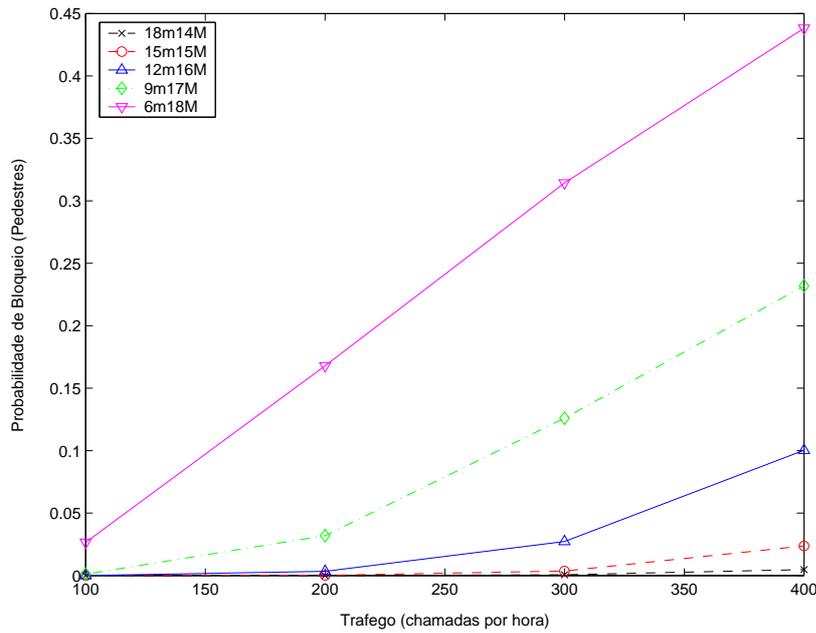


Figura 5.23 Probabilidade de bloqueio de usuários pedestres em função do tráfego de entrada (75,25)

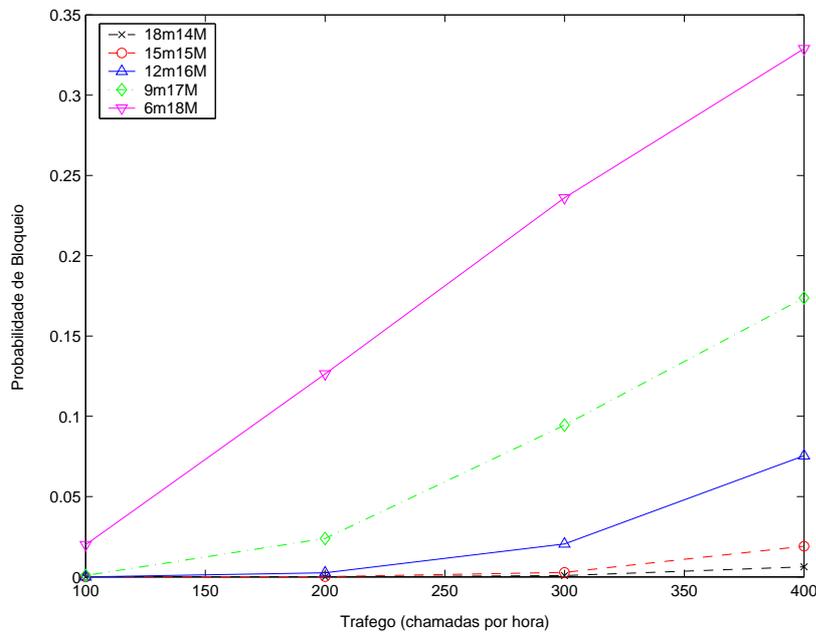


Figura 5.24 Probabilidade de bloqueio de usuários em função do tráfego de entrada (75,25)

5.6 Comparação entre as Estratégias Estudadas

Para a comparação dos resultados entre as diversas estratégias estudadas foi mantida uma divisão do espectro com 12 canais nas micro-células e 16 canais por setor de macro-célula.

A figura 5.25 mostra o número médio de usuários ativos. Para tráfegos baixos as estratégias apresentaram desempenhos semelhantes. A medida em que o tráfego foi aumentando, a estratégia clássica reversível, por gerir de maneira mais flexível os recursos do sistema, apresentou melhor resultado.

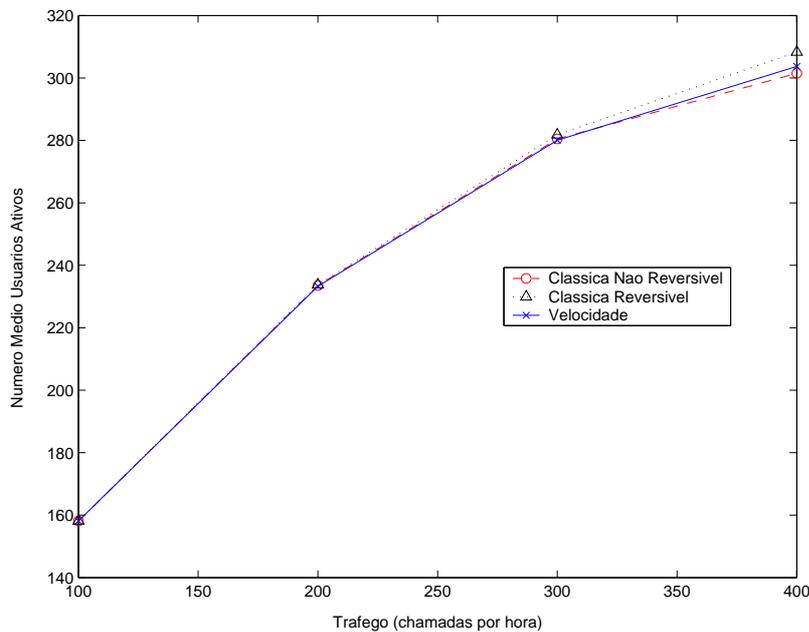


Figura 5.25 Número médio de usuários ativos em função do tráfego de entrada (50,50)

A maior capacidade de comportar novos usuários da estratégia clássica reversível pode ser explicada pela probabilidade de bloqueio. Para o caso de usuários pedestres, figura 5.26, a estratégia da velocidade apresentou pior desempenho por não permitir o transbordo dos pedestres bloqueados nas micro-células para as macro-células. As estratégias clássica reversível e não-reversível apresentaram desempenhos bem próximos, exceto para tráfegos bem altos.

No caso dos usuários veiculares, figura 5.27, a probabilidade de bloqueio destes na estratégia da velocidade foi a que apresentou melhor desempenho justamente pelo fato de não ter havido usuários pedestres tentando alocar-se na macro-célula. A estratégia clássica reversível apresentou desempenho melhor do que a não-reversível devido ao fato de os usuários pedestres alocados nas macro-células retornarem para as micro-células assim que houve liberação de canal nesta camada. Esta permissão de retorno dos usuários pedestres teve como consequência um maior número de canais disponíveis nas macro-células

para os usuários veiculares.

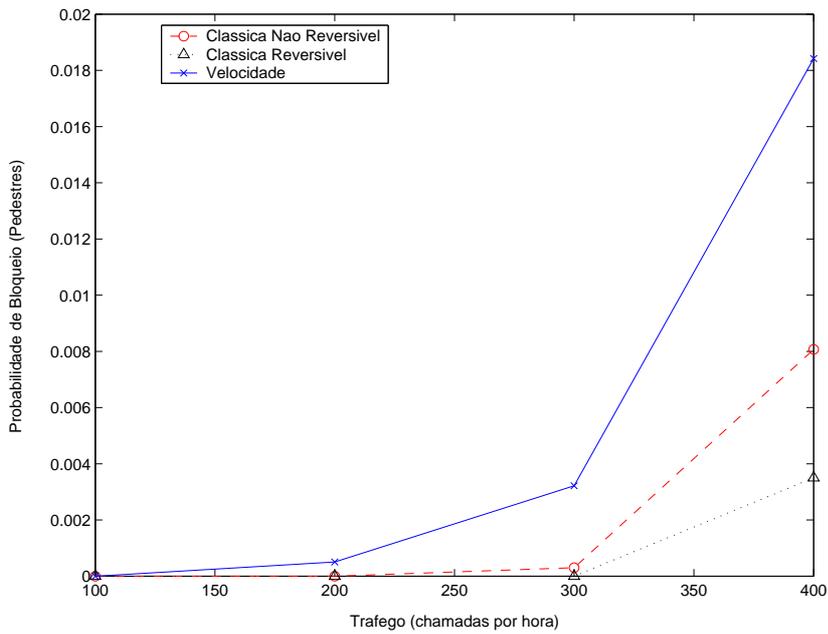


Figura 5.26 Probabilidade de bloqueio de usuários pedestres em função do tráfego de entrada

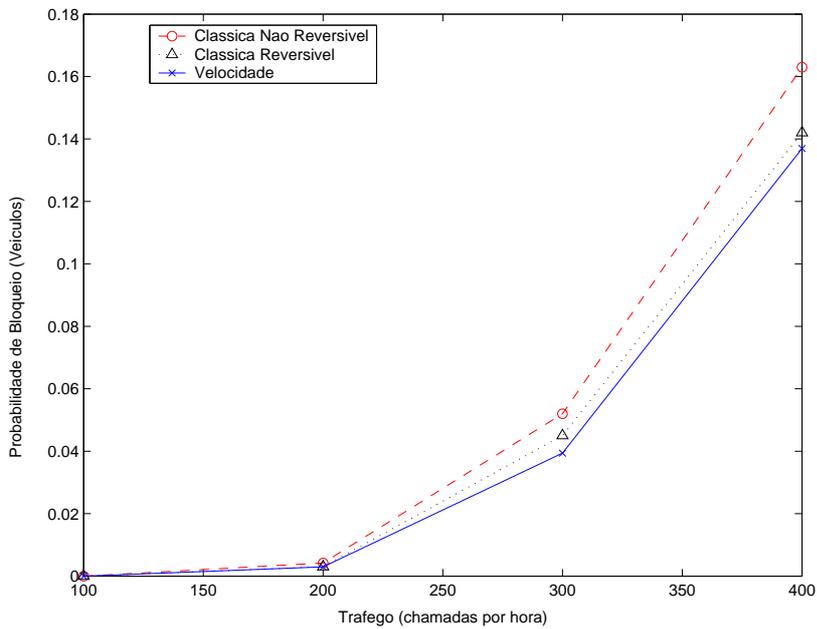


Figura 5.27 Probabilidade de bloqueio de usuários veiculares em função do tráfego de entrada

A probabilidade de bloqueio de novos usuários, figura 5.28, portanto, foi menor para a estratégia clássica reversível.

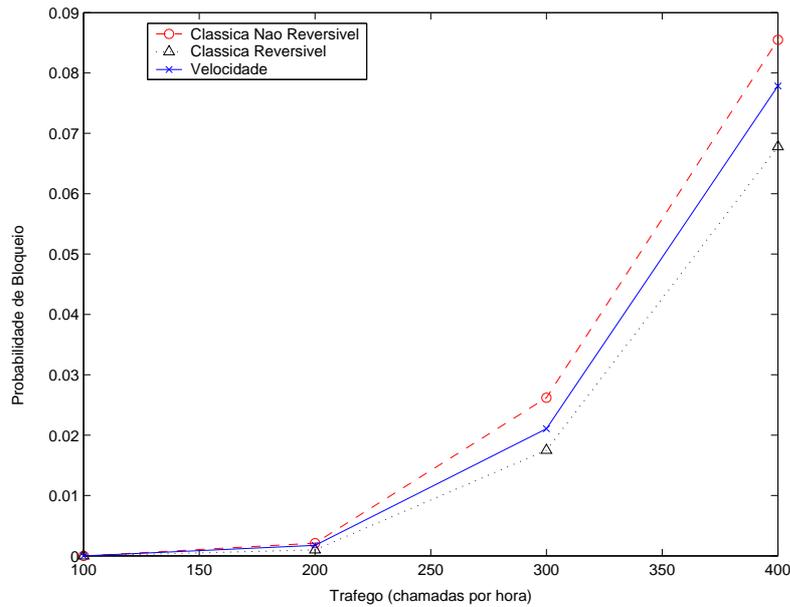


Figura 5.28 Probabilidade de bloqueio de usuários em função do tráfego de entrada

O fato de a estratégia clássica reversível ter permitido a entrada de um maior número de usuários no sistema, tornou o sistema mais vulnerável a falhas durante o procedimento de *handoff*. Com isso houve um crescimento na probabilidade de terminação forçada, como mostra a figura 5.29. As simulações mostraram que a probabilidade de terminação forçada foi ligeiramente maior para os usuários pedestres, tendo em vista que estes por estarem mais concentrados nas micro-células efetuaram um maior número de *handoffs* do que os usuários veiculares.

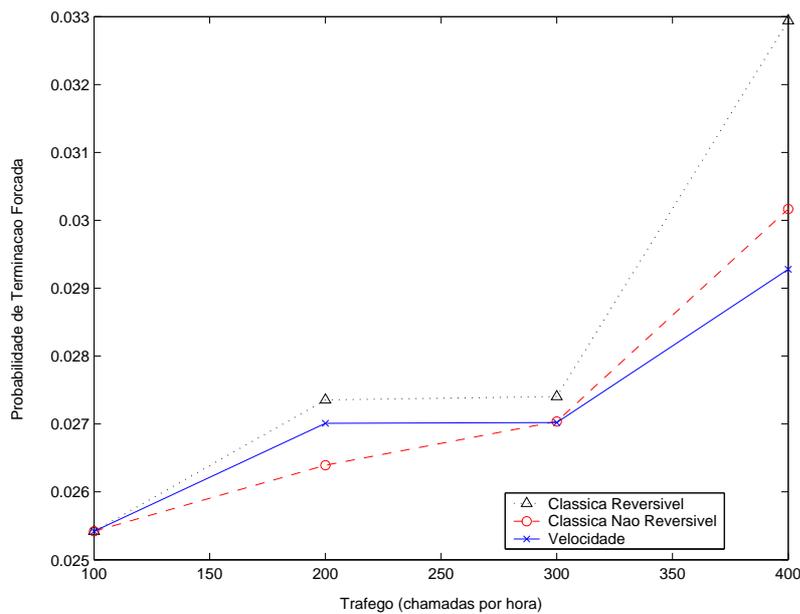


Figura 5.29 Probabilidade de terminação forçada de usuários em função do tráfego de entrada

Vale ressaltar o comportamento da probabilidade de terminação forçada para o caso da simulação com 75% de usuários pedestres e 25% de usuários veiculares. A figura 5.30 mostra a probabilidade de terminação forçada para este caso.

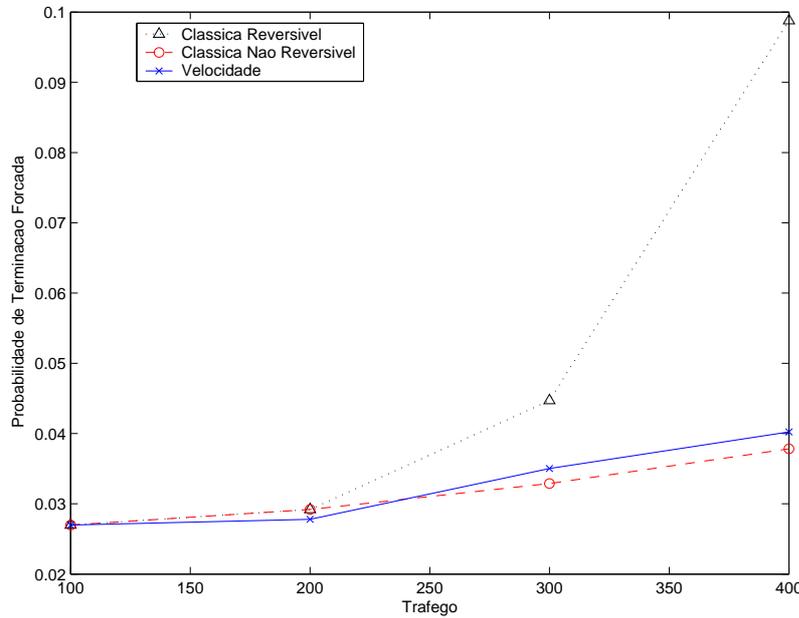


Figura 5.30 Probabilidade de terminação forçada de usuários em função do tráfego de entrada (75,25)

A probabilidade de terminação forçada sofreu um aumento em relação ao caso (50,50). Este aumento deveu-se ao maior número de usuários alocados nas micro-células. Na tabela 5.6 pode-se ver que para um tráfego de entrada de 300 chamadas por hora, o número de usuários alocados nas micro-células no caso (75,25) foi bem maior que no caso (50,50). Isto implicou um aumento do número de *handoffs* e conseqüentemente um aumento na vulnerabilidade a falhas neste procedimento.

Tabela 5.6 Número de Usuários por camada

	50% Pedestres 50% Veículos	75% Pedestres 25% Veículos
Número médio de usuários ativos	282.05	283.98
Número médio de usuários ativos nas micro-células	138.24	201.18
Número médio de usuários ativos nas macro-células	143.81	82.80

5.7

Comparação com um Sistema Puramente Macro-Celular

Outro teste realizado foi a comparação de um sistema celular hierarquizado com um sistema celular composto por apenas macro-células. O espectro disponível para os dois sistemas foi o mesmo. O sistema hierarquizado possuía 12 canais nas micro-células e 16 canais por setor de macro-célula e a estratégia utilizada foi a clássica reversível. Já o sistema macro-celular possuía 20 canais por setor. Os dois sistemas possuíam, no total, 420 canais. O número de chamadas geradas por usuários pedestres e veiculares foi o mesmo nos dois sistemas testados.

Na tabela 5.7 é possível observar que o sistema hierarquizado comportou muito mais usuários do que um sistema puramente macro-celular a custo de um pequeno aumento na probabilidade de terminação forçada e de um aumento significativo na carga de sinalização devido ao aumento do número de tentativas de *handoff*. Além disso, para o tráfego em questão, o sistema macro-celular já apresentava uma saturação no número de usuários que pode ser vista pela elevada probabilidade de bloqueio que ele apresentou.

Tabela 5.7 Resultados da comparação entre um sistema celular hierarquizado e um sistema macro-celular para o mesmo tráfego

	Sistema Hierarquizado	Sistema Macro-Celular
Número médio de usuários ativos	281.79	210.23
Probabilidade de Bloqueio de Pedestres	0%	2.27%
Probabilidade de Bloqueio de Veículos	4.10%	2.62%
Probabilidade de Bloqueio Média	2.05%	2.45%
Probabilidade de Terminação Forçada	2.74%	1.48%
Número de Tentativas de <i>Handoff</i>	1850	427

Pode-se concluir que para tráfegos que ofereçam a mesma probabilidade de bloqueio para os dois sistemas, o sistema hierarquizado irá apresentar uma capacidade bem maior do que o sistema macro-celular.