



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

**TESE DE DOUTORADO**

**Metodologia de Dimensionamento de Canais para  
Soft Handoff em Sistemas CDMA**

**Omar Carvalho Branquinho**

**Orientador: Michel Daoud Yacoub**

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub, Presidente – FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Walter Godoy Jr. – CEFET - PR

Prof. Dr. Edson Luiz Ursini – Fundação Centro de Pesquisa – CPqD

Prof. Dr. César Kyn d'Ávila – Centro de Desenvolvimento Tecnológico - CEDET

Prof. Dr. Rui Fragassi Souza FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Renato Baldini Filho FEEC/UNICAMP

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas, como parte do requisito exigido para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Novembro - 2001

B227m Branquinho, Omar Carvalho.  
Metodologia de dimensionamento de canais para soft  
handoff em sistemas CDMA / Omar Carvalho  
Branquinho. --Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientador: Michel Daoud Yacoub.  
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de  
Computação.

1. Sistemas móveis. 2. Telefonia celular. 3.  
Sistemas de telecomunicação. I. Yacoub, Michel  
Daoud. II. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.  
III. Título.

**Dedico esta tese a Ellen, Omar, Rafael e Helena, esposa e filhos, razão de todo meu esforço. Nada se consegue sem esforço e sem renúncia. Foram estas pessoas que sentiram minha ausência, em incontáveis fins de semana sem minha atenção. Acredito que tenha valido a pena.**

## Resumo

Este trabalho objetiva o desenvolvimento de uma metodologia de dimensionamento de canais para *soft handoff* em sistemas CDMA. O planejamento de sistemas móveis celulares CDMA tem características que o distinguem do planejamento de outras técnicas de acesso. As metodologias disponíveis atualmente para o planejamento ou são muito complexas e com considerações que se contrastam, com um nível de sofisticação que não condiz com o grau do empirismo dos parâmetros, ou são muito simples mas pouco rigorosas. Esta tese tem por objetivo a proposta de um metodologia, simples e de fácil aplicação, de dimensionamento de canais de *soft handoff*, que leve em conta tanto a questão do bloqueio de *soft handoff*, quanto a influência destes canais na interferência. Para desenvolvimento desta metodologia são considerados os arranjos de duas e três células. Para estes dois arranjos são obtidas as probabilidades de bloqueio de *soft handoff* e *outage*. Estas probabilidades são empregadas no dimensionamento de sistemas CDMA. A técnica de dimensionamento proposta é comparada com as técnicas usualmente utilizadas.

**Palavras-Chave:** Sistemas CDMA, planejamento celular, *soft handoff*.

## Abstract

This thesis develops a methodology for dimensioning CDMA system soft handoff channel. CDMA systems exhibit peculiarities that render system planning a task quite distinct from that used in other access technologies. The planning methodologies used currently are either complex, using parameters that are not realistic, or simplistic, yielding poor results. This thesis presents a simple and easy-to-use planning method for determining the number of soft handoff channels. The methodology development considers two and three-cells configurations. This planning method considers soft handoff blocking and system interference as input parameters.

**Key Words:** CDMA systems, cellular planning, soft handoff.

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub, pela oportunidade e paciência na orientação do trabalho.

Aos Engenheiros Ralph Henrich e Eduardo Moreno Marques, pelo incentivo e apoio.

Aos meus pais, Sebastião Omar Pereira Branquinho e Evandra Maria de Carvalho Branquinho, pelo exemplo de vida que representam.

Aos colegas do CPqD, pelo apoio e incentivo.

## Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>CONSIDERAÇÕES SOBRE SISTEMAS CDMA .....</b>	<b>5</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	5
2.2	ELEMENTOS DO SISTEMA CDMA .....	7
2.3	PROCESSO DE SOFT HANDOFF .....	9
2.4	CAPACIDADE DO SISTEMA CDMA .....	15
2.5	TÉCNICAS DE PLANEJAMENTO EM USO.....	20
2.5.1	<i>Proporção de Sobreposição de Três Células .....</i>	<i>20</i>
2.5.2	<i>Planejamento Utilizando Fator de Redução .....</i>	<i>23</i>
2.5.3	<i>Planejamento Utilizando Limite de Interferência .....</i>	<i>27</i>
2.6	CONCLUSÃO .....	32
<b>3</b>	<b>CONSIDERAÇÕES SOBRE DUAS CÉLULAS.....</b>	<b>35</b>
3.1	INTRODUÇÃO.....	35
3.2	DISTRIBUIÇÃO DE CANAIS ATIVOS NA REGIÃO DE SOBREPOSIÇÃO .....	36
3.2.1	<i>Cálculo de <math>p_k</math> para distribuição de Erlang-B.....</i>	<i>39</i>
3.2.2	<i>Cálculo de <math>p_k</math> para distribuição Binomial.....</i>	<i>44</i>
3.3	BLOQUEIO DE SOFT HANDOFF .....	46
3.4	PROBABILIDADE DE OUTAGE .....	48
3.4.1	<i>Cálculo da Probabilidade de Outage – primeira abordagem.....</i>	<i>49</i>
3.4.2	<i>Probabilidade de Outage – segunda abordagem.....</i>	<i>54</i>
3.5	CONCLUSÃO .....	57
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES SOBRE TRÊS CÉLULAS .....</b>	<b>59</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	59
4.2	ANÁLISE DAS REGIÕES DE SOBREPOSIÇÃO .....	60
4.3	DISTRIBUIÇÃO DE CANAIS ATIVOS NAS REGIÕES DE SOBREPOSIÇÃO .....	62
4.3.1	<i>Cálculo de <math>p_{k_1k_2}</math> para a distribuição de Erlang-B .....</i>	<i>66</i>
4.3.2	<i>Cálculo de <math>p_{k_1k_2}</math> para a distribuição Binomial .....</i>	<i>67</i>
4.4	BLOQUEIO DE SOFT HANDOFF .....	70
4.5	PROBABILIDADE DE OUTAGE .....	74
4.5.1	<i>Cálculo da Probabilidade de Outage.....</i>	<i>74</i>
4.6	CONCLUSÃO .....	81
<b>5</b>	<b>ESTRATÉGIAS DE ALOCAÇÃO DE CANAIS.....</b>	<b>83</b>
5.1	INTRODUÇÃO.....	83
5.2	ESTRATÉGIAS DE ALOCAÇÃO .....	84
5.2.1	<i>Estratégia de Alocação 1 - Aumento de Canais.....</i>	<i>86</i>
5.2.2	<i>Estratégia de Alocação 2 – Diminuição de Canais.....</i>	<i>87</i>
5.2.3	<i>Estratégia de Alocação 3 - Aumentando e Diminuindo os Canais .....</i>	<i>88</i>
5.3	RESULTADOS PARA DUAS CÉLULAS .....	90
5.3.1	<i>Estratégia de Alocação 1 - Aumento de Canais.....</i>	<i>90</i>
5.3.2	<i>Estratégia de Alocação 2 – Diminuição de Canais.....</i>	<i>99</i>

5.3.3	<i>Estratégia de Alocação 3 - Aumentando e Diminuindo os Canais</i>	101
5.4	RESULTADOS PARA TRÊS CÉLULAS	114
5.4.1	<i>Estratégia de Alocação 1 - Aumento de Canais</i>	114
5.4.2	<i>Estratégia de Alocação 2 – Diminuição de Canais</i>	123
5.4.3	<i>Estratégia de Alocação 3 - Aumentando e Diminuindo os Canais</i>	126
5.5	CONCLUSÃO	139
<b>6</b>	<b>METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO</b>	<b>141</b>
6.1	INTRODUÇÃO	141
6.2	ANÁLISE DAS PROBABILIDADES	142
6.2.1	<i>Probabilidade de Bloqueio de Soft handoff</i>	144
6.2.2	<i>Probabilidade de Outage</i>	146
6.3	MÉTODO DE PLANEJAMENTO	147
6.3.1	<i>Estratégia de Alocação 1 – Aumento de Canais</i>	148
6.3.2	<i>Estratégia de Alocação 2 – Diminuição de Canais</i>	149
6.3.3	<i>Estratégia de Alocação 3 – Aumentando e Diminuindo os Canais</i>	150
6.4	CONCLUSÃO	151
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>153</b>
7.1	INTRODUÇÃO	153
7.2	EVOLUÇÃO DO TRABALHO	154
7.3	CONCLUSÃO	156
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>159</b>

# 1 Introdução

Durante anos o tema “capacidade do sistema CDMA” tem sido matéria de muita controvérsia. Muito mais do que técnicos, os interesses por trás desta discussão são realmente comerciais. Os estudos iniciais demonstravam com todos os argumentos que, em uma mesma faixa de frequência, para cada conversação no sistema analógico era possível se colocar 40 conversações no sistema CDMA. Certamente isto foi rebatido pelos defensores da tecnologia TDMA e o debate tornou-se acalorado, com a relação 40:1 paulatinamente desabando até chegar em algo próximo de 6:1. Qualquer que seja esta relação os números sempre podem ser contestados. Isto se deve a uma grande quantidade de variáveis que influencia o comportamento do sistema e é extremamente complicado se definir o valor exato destas variáveis. Elas se comportam de forma aleatória e os valores são tomados de acordo com a média.

Como apropriado, a controvérsia não estaciona no simples cálculo do número de canais para acomodar o tráfego da própria célula. Algo que, de um modo geral, passa despercebido tanto para sistemas analógicos quanto para sistemas digitais torna-se questão de disputa entre os próprios fornecedores de tecnologia CDMA e certamente os de TDMA. A questão diz respeito ao dimensionamento de canais para *soft handoff*, novamente a velha querela da capacidade do sistema. Enquanto que nos demais sistemas o *handoff* pode ser tratado como um processo quase que marginal, nos sistemas CDMA o problema é crítico.

Um móvel na fronteira entre células poderá se comunicar com duas ou mais células. Nos sistemas FDMA e TDMA este fenômeno determina a célula da qual o canal de comunicação será utilizado no cruzamento entre fronteiras, liberando-se assim o canal da célula de origem. Pode-se dizer que, em média, para cada canal capturado na outra célula libera-se um canal na célula de origem. Desta forma joga-se com a situação de equilíbrio para se dizer que o *handoff* nestas tecnologias pouco influi no dimensionamento do sistema.

Já no sistema CDMA, um móvel na periferia da célula contribui com uma grande parcela de interferência na outra célula, o que proporciona uma diminuição da capacidade como um todo. O fato de este móvel poder se comunicar com mais de uma célula pode ser utilizado em benefício do sistema, diminuindo-se a potência do móvel e combinando-se os sinais neste móvel para se obter um nível adequado de recepção. Neste sentido, mais do que uma prerrogativa ou uma regalia dos sistemas CDMA, o *soft handoff* é uma necessidade. Em teoria, o *soft handoff* não influencia no cálculo da capacidade do enlace reverso, já que os móveis nesta condição transmitem estando ou não em *soft handoff*. Esta condição porém pode ser alterada se a potência do móvel for reduzida em função da diversidade com duas bases [1][2]. Já o mesmo não se pode dizer com relação ao enlace direto. Neste caso, como um móvel poderá ocupar canais tanto na célula de origem quanto nas demais com as quais a comunicação é adequada, um número adicional de canais deverá ser provido para acomodar esta condição.

Algumas metodologias foram propostas para a determinação da capacidade do sistema CDMA. Umas mais complexas dizem respeito à capacidade de *Erlang* [3]. Em particular, nestas metodologias as considerações se contrastam, com um nível de sofisticação na obtenção das fórmulas que não condiz com o grau do empirismo dos parâmetros utilizados nelas. Considera-se ainda uma aproximação Gaussiana em uma somatória em que o próprio limite desta somatória é uma variável aleatória, o que no mínimo é facilmente contestável. Além disto, as fórmulas são deduzidas para a condição de tráfego uniforme, situação pouco encontrada na prática. A dificuldade de manipulação destas fórmulas torna inviável a sua aplicação no dimensionamento de sistemas práticos.

De fato, na prática uma outra metodologia é utilizada [1]. Nesta metodologia, introduzem-se os conceitos de tráfego aparente e tráfego real. O tráfego aparente é aquele pelo qual o sistema pode cobrar do usuário. O tráfego real é aquele efetivamente tratado pelo sistema. Um usuário na condição de *soft handoff* utiliza mais recursos do que um mínimo necessário. Por outro lado, ele não poderá pagar por se encontrar na condição de *soft handoff*. Para o dimensionamento de canais para satisfazer a condição de *soft handoff*, utiliza-se o fator de carga dado pela razão entre a carga real e a carga aparente. Tanto nesta

metodologia quanto nas anteriores, nada se diz a respeito ao bloqueio de *soft handoff*. Nesta última metodologia nada se conjectura a respeito da interferência causada pela utilização dos canais de *soft handoff*. Por outro lado, este esquema é extremamente simples de ser utilizado, o que o torna muito popular em planejamentos práticos.

O presente trabalho tem por objetivo a proposta de uma nova metodologia, de fácil aplicação, de dimensionamento de canais de *soft handoff* que leve em conta tanto a questão do bloqueio de *soft handoff* quanto a da influência destes canais na interferência. Em comum com a metodologia mais simples, o método proposto faz uso do tráfego aparente para se determinar o tráfego real. Em comum com as metodologias mais complexas, o método proposto se preocupa com a questão da interferência. Em adição a ambas leva-se em consideração o bloqueio de *soft handoff*. A determinação do tráfego real na metodologia proposta, por outro lado, será consequência tanto do bloqueio de *soft handoff* quanto da interferência.

O trabalho está organizado da seguinte maneira. O Capítulo 2 faz considerações sobre o sistema CDMA, apresentando suas características pertinentes ao trabalho apresentado. Neste capítulo também são apresentadas as técnicas de planejamento utilizadas atualmente. Em seguida são apresentadas estratégias de alocação de canais de *soft handoff*, que serão utilizadas neste trabalho.

O Capítulo 3 trata do arranjo de duas células. Para este arranjo são determinadas as probabilidades de bloqueio de *soft handoff* e *outage*. São utilizadas as distribuições de *Erlang-B* e *Binomial* para o cálculo das probabilidades, sendo feita uma comparação dos resultados obtidos com cada uma das distribuições. A distribuição *Binomial* é utilizada como uma alternativa à utilização da distribuição de *Erlang-B*. O objetivo na utilização da distribuição *Binomial* é na redução do tempo de computação para obtenção dos resultados.

O Capítulo 4 trata do arranjo de três células. Como no Capítulo 3, são determinadas as probabilidades de interesse para o trabalho, utilizando também as distribuições de

*Erlang-B* e *Binomial*. Também aqui é feita uma comparação dos resultados para cada uma das distribuições.

O Capítulo 5 apresenta os resultados dos cálculos das probabilidades tanto para o arranjo de duas células quanto para o arranjo de três células. Neste capítulo serão apresentados os gráficos necessários para a aplicação da metodologia. São utilizadas as estratégias para alocação de canais para *soft handoff* apresentadas no Capítulo 2.

O Capítulo 6 apresenta a aplicação da metodologia de planejamento utilizando os resultados obtidos no Capítulo 5. São explorados os conceitos de planejamento propostos por este trabalho ressaltando as peculiaridades da metodologia proposta.

O Capítulo 7 apresenta a conclusão procurando identificar as vantagens do método proposto em comparação com os outros métodos. São feitas considerações sobre possíveis evoluções da metodologia apresentada.

## 2 Considerações Sobre Sistemas CDMA

### 2.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os aspectos gerais do sistema CDMA de interesse para este trabalho. Primeiramente, serão identificados os elementos do sistema e suas principais características. Em seguida, são consideradas as características da operação de *soft handoff*, que difere significativamente do *handoff* de outros sistemas celulares. No próximo item, é considerada a capacidade do sistema CDMA. A seguir, são consideradas as técnicas de planejamento utilizadas atualmente para o dimensionamento do sistema CDMA. O capítulo termina com uma conclusão considerando os itens tratados.

A técnica de espalhamento espectral, utilizada no sistema CDMA, não é recente. Porém, seu uso se restringia às aplicações militares, que empregavam o espalhamento espectral como uma técnica de transmissão de informação com maior imunidade à interceptação. Na década de 80, teve início a utilização desta técnica para aplicação civil com o desenvolvimento de sistemas celulares móveis empregando CDMA. O desenvolvimento desta tecnologia pela empresa QUALCOMM [4] despertou no mundo o seu grande potencial em sistemas celulares. O CDMA constitui-se ainda como proposta para sistemas móveis de terceira geração, comprovando sua potencialidade.

A técnica CDMA se diferencia das demais técnicas de acesso em vários aspectos. Para a técnica CDMA, o reuso pode ser igual a 1, diferentemente do que acontece com as técnicas FDMA e TDMA, que utilizam como reuso típico o valor 7. A utilização da mesma faixa de frequência por todos os usuários é outra importante característica, que identifica o CDMA como uma técnica de acesso com limite de capacidade dependente da interferência existente no sistema, sendo este também conhecido como *soft blocking*. Estas características levam a técnicas de implementação e planejamento do CDMA, as quais, são diferentes das técnicas tradicionais utilizadas nos outros métodos de acesso (FDMA e TDMA).

No princípio, acreditava-se que a capacidade do sistema CDMA suplantava em 40 vezes a do sistema AMPS. Porém, por questões práticas e mesmo de planejamento adequado do sistema, esta enorme vantagem caiu a um valor realista próximo de 6 vezes. Vários aspectos que, em princípio, pareciam sob controle se mostraram variáveis de complexa solução. Uma destas questões é o controle de potência que é de fundamental importância em sistemas CDMA. Sem um adequado ajuste da potência de transmissão do móvel, existe um problema crítico no enlace reverso (móvel para base), chamado de *near-far problem* [1]. No sistema móvel CDMA, os usuários estão dispersos na célula transmitindo na mesma frequência. Considerando uma distribuição uniforme dos usuários, existirão usuários próximos e usuários com maior distância da estação base. A potência recebida dos usuários próximos é maior que a potência do sinal dos usuários que estão a uma maior distância da estação base. Os usuários próximos causam interferência nos usuários com maior distância, degradando o desempenho destes. Para combater este efeito, a potência dos móveis deve ser ajustada continuamente, fazendo com que o sinal de todos os usuários chegue com a mesma potência na estação base. Sendo assim, sem um controle de potência eficiente existe uma degradação da performance do sistema, o que faz com que usuários próximos tenham um desempenho melhor que usuários que estão a uma distância maior da estação base. O controle de potência é implementado para minimizar o efeito do *near-far problem* de forma que haja uma maximização da capacidade do sistema.

Outro fato, de relevância ao presente trabalho, é a questão de *soft handoff*. Este tipo de *handoff* é bastante diferente daquele empregado pelas outras técnicas de acesso, o que possibilita que um móvel se comunique com duas estações base. A possibilidade de conexão simultânea de um móvel com mais de uma base traz vantagens e desvantagens. Uma vantagem é a possibilidade de um *handoff* suave, uma vez que a passagem de uma estação base à outra somente se dá sob condições bem definidas e ajustáveis no sistema. Assim, ao contrário do que acontece nos outros sistemas, onde, na realização do *handoff*, é necessário desconectar-se de uma estação base de origem e conectar-se em seguida em outra estação base de destino (*break-before-make*), no caso do CDMA, o móvel fica conectado a duas estações base, ou mesmo a três, e a desconexão da estação base de origem

é feita suavemente com o móvel já conectado à estação base de destino (*make-before-break*).

Porém, esta possibilidade de conexão simultânea do móvel com mais de uma base leva a um planejamento e dimensionamento do número de canais alocados à estação base com características diferentes daquelas utilizadas em sistemas convencionais. Sendo assim, será necessário no dimensionamento de sistemas CDMA levar em consideração a utilização de canais para cursar o tráfego de *soft handoff*. Este trabalho trata, pois, desta questão, ou seja, do tráfego demandado pela operação de *soft handoff* e seu conseqüente efeito no planejamento do sistema, considerando esta condição.

## **2.2 Elementos do Sistema CDMA**

O sistema CDMA apresenta configuração semelhante a de outras tecnologias de acesso. As diferenças se concentram na interface aérea com a utilização da técnica de espalhamento espectral como elemento chave para realizar o acesso. Esta técnica de acesso permite a utilização de fator de reuso de frequência igual a 1. Outro ponto interessante é a necessidade de sincronismo entre as estações base. A Figura 2.1 apresenta os elementos básicos de um sistema móvel CDMA, mostrando três células com cobertura circular [5].

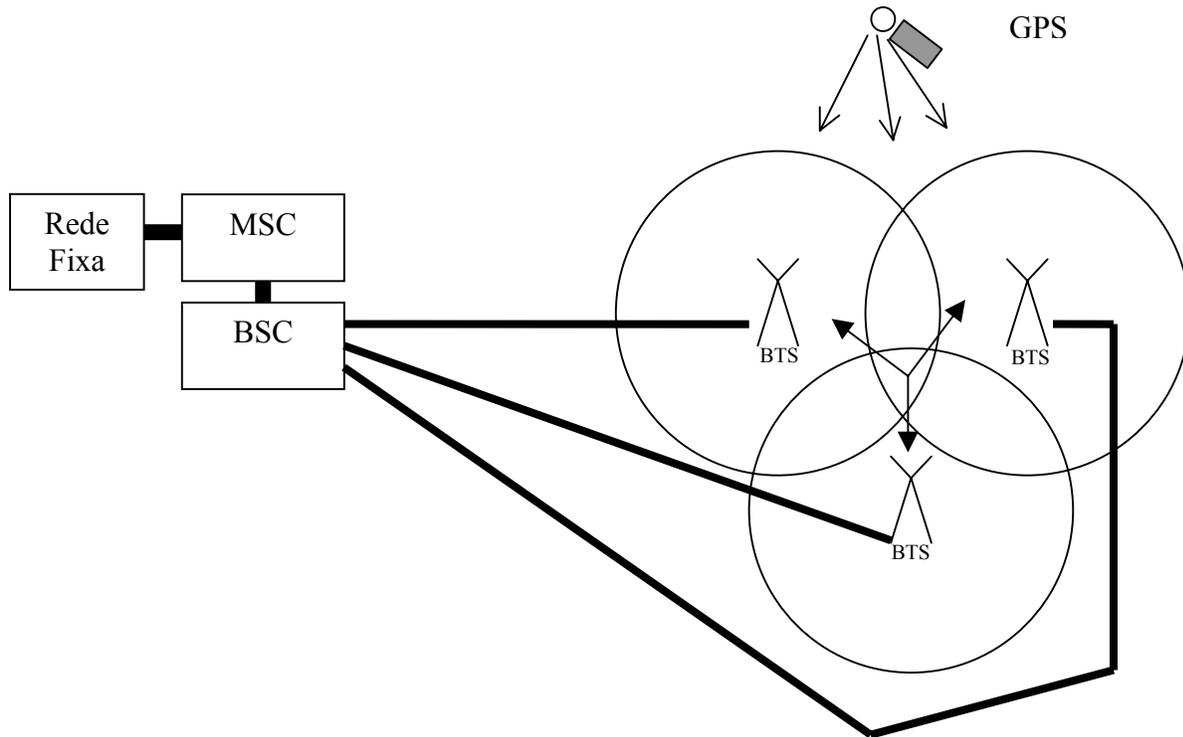


Figura 2.1 – Elementos do sistema CDMA

A MSC (*Mobile Switching Center*) é o elemento de comutação e de conexão entre as redes fixa e móvel. A BSC (*Base Station Controller*) controla várias estações base, denominadas BTS (*Base Transceiver Station*), fazendo principalmente o gerenciamento do recurso rádio. A estação base é o elemento de RF e possui os transceptores, antenas, etc. No conjunto BSC/BTS são ajustados os parâmetros que afetam as condições de *soft handoff*. Estes parâmetros serão analisados mais adiante. O sistema CDMA, descrito pela IS-95A, é síncrono. Isto significa que as estações base operam em sincronismo entre si [5], o qual é obtido através do GPS (*Global Positioning System*). Além da posição geográfica, este sistema também transmite uma informação precisa de tempo, com precisão de um microsegundo em relação à coordenada de tempo universal. Esta referência de tempo é necessária no processo de *soft handoff* estabelecido pela IS-95A, pois torna o processo de combinação dos sinais provenientes de duas ou mais estações base uma tarefa mais simples. Esta combinação é realizada por uma estrutura chamada RAKE receiver [3]. O padrão WCDMA Europeu [6], proposto para ser a interface área dos sistemas de terceira geração de sistemas móveis, não utiliza este tipo de sincronismo entre estações base, o que torna mais complexo o processamento do sinal recebido por diferentes BTSs. Porém, a não utilização do

sincronismo entre estações base torna o sistema independente de um elemento externo, no caso o GPS.

Embora a Figura 2.1 seja ilustrativa, fica clara a formação de áreas de sobreposição entre duas e três células. Os parâmetros que alteram as áreas de sobreposição, e conseqüentemente alteram as condições de *soft handoff*, podem ser divididos em dois tipos: parâmetros de RF e parâmetros de sistema. Todos os parâmetros, em última análise, influenciam no arranjo celular, aumentando ou diminuindo as regiões de sobreposição. Como será visto, a proporção de áreas de sobreposição é uma informação importante na proposta deste trabalho para o dimensionamento do sistema CDMA. Quanto maiores estas regiões de sobreposição maior será a probabilidade de se encontrarem usuários ativos nestas áreas e, conseqüentemente, maior a chance de estes estarem na situação de *soft handoff*.

Os parâmetros de RF, mencionados acima, são, por exemplo, os seguintes: a potência, o ganho de antena, etc. Estes parâmetros definem uma cobertura física estabelecendo a intensidade do sinal ao longo de uma região. Já os parâmetros de sistema são aqueles ajustados pelo conjunto BSC/BTS, e que estabelecem uma cobertura lógica, os quais também afetam as regiões de sobreposição. Estes parâmetros, por exemplo, alteram os limiares em que se inicia o processo de *soft handoff*. Estes parâmetros de sistema estão descritos no próximo item, onde é apresentado o processo de *soft handoff*. Assim sendo, fixando os parâmetros de RF, a determinação das áreas das células e, por conseguinte, as áreas de sobreposição, é feita através dos parâmetros de sistema.

### **2.3 Processo de Soft Handoff**

O padrão IS-95A especifica que o receptor móvel deve ter, no mínimo, quatro elementos de recepção independentes. No mínimo, devem existir três elementos com capacidade para demodular o canal direto, ou seja, receber os dados transmitidos. No mínimo, deve existir um elemento *searcher* para estimar a intensidade de sinal dos pilotos. O *RAKE receiver* é o elemento que permite a recepção de vários sinais [7]. A medida da intensidade dos pilotos

de várias bases é utilizada no processo de *soft handoff*. Quando o móvel não está em *soft handoff*, o *RAKE receiver* realiza a diversidade temporal. Quando na condição de *soft handoff*, o *RAKE receiver* recebe os sinais provenientes de diferentes estações base. Este processo de recepção de diversas estações base, quando em *soft handoff*, funciona como diversidade de espaço, uma vez que o mesmo sinal é recebido de estações base situadas em diferentes locais. No enlace reverso, o sinal do móvel é recebido por duas ou mais bases. Salienta-se que, neste caso, devem ser alocados canais nas estações base para receber o sinal do móvel. Após a demodulação do sinal proveniente do móvel nas estações base, estas enviam quadro-a-quadro os dados à BSC. A BSC utiliza um processo de seleção do melhor quadro, realizando assim um processo de diversidade.

Em geral, são encontrados no móvel *RAKE receivers* com três braços para recepção e demodulação do sinal, mais um braço para realização do *searcher*, sendo este último necessário para realizar a busca de novos pilotos e a estimativa de sua potência. Sendo assim, o móvel pode se conectar simultaneamente com três estações base distintas no processo de *soft handoff*. Nas regiões de sobreposição entre células, que em geral acontece nas bordas das células [2], este processo de *soft handoff* provê diversidade no canal de tráfego direto (base-móvel), através do *RAKE receiver* no móvel, e no canal de tráfego reverso (móvel-base), através da recepção de duas ou três estações base. Esta diversidade obtida no enlace reverso é muito importante na redução da interferência, pois possibilita que o móvel transmita com menor potência. O mecanismo utilizado para garantir que o móvel transmita com menor potência é feito utilizando-se as mensagens de controle de potência enviadas pelas estações base [4]. Neste processo, basta apenas uma das estações base enviar o comando para baixar a potência e o móvel diminuir sua potência, mesmo que as outras estações base enviem mensagens para aumento da potência do móvel. Somente quando todas as estações base envolvidas no processo de *soft handoff* enviarem comando de aumento de potência é que o móvel irá aumentar sua potência.

O sistema CDMA, padronizado pela IS-95A [4], suporta diferentes tipos de *handoff*. O primeiro é o *soft handoff*, que ocorre quando um móvel passa de uma célula a outra, com células de mesma frequência. Na região de sobreposição existe comunicação simultânea de

duas ou mais BTSs com o móvel. Este tipo de *soft handoff* é o mais freqüentemente tratado na literatura [2].

O segundo tipo é o *softer handoff*, o qual ocorre quando o móvel transita entre dois setores diferentes de uma mesma BTS. No enlace direto, o móvel realiza o mesmo tipo de processo de combinação feito no *soft handoff*. No enlace reverso, no entanto, dois setores de uma mesma célula recebem o sinal do móvel. Neste caso, o sinal será selecionado dentro da BTS e somente um quadro será enviado para a BSC.

O terceiro tipo é o *hard handoff*, existindo dois tipos diferentes: CDMA-a-CDMA e CDMA-a-analógico. O primeiro acontece quando o móvel passa de uma BTS CDMA para outra BTS CDMA, com freqüências diferentes. Este *handoff* também é denominado por Digital-a-Digital *handoff*. Neste caso, como o próprio nome diz, vai existir um *hard handoff*. O outro tipo é o *handoff* onde o móvel passa de uma área servida por uma BTS CDMA para uma área servida por uma BTS do sistema analógico. Este *handoff* também é denominado por Digital-a-Analógico *handoff*.

O móvel participa ativamente no processo de *soft handoff*, notificando constantemente a BTS sobre as condições de propagação. A BTS faz uso destas informações para a decisão na realização do *handoff*. A esta participação do móvel é dado o nome de *Mobile Assisted Handoff*. A estação móvel procura por pilotos através do *searcher* para detectar a presença de canais CDMA e, desta forma, realiza a medida de sua intensidade. Quando a estação móvel detecta um piloto de intensidade adequada, que não esteja associado a nenhum dos Canais de Tráfego Direto (*Forward Traffic Channels*) designados para ele, o móvel envia para a BTS uma mensagem contendo a intensidade medida do piloto (*Pilot Strength Measurement Message*). A BTS pode alocar um canal de tráfego direto (*Forward Traffic Channel*) associado a este piloto e pode direcionar o móvel para um *handoff*.

A identificação de um piloto pelo móvel se baseia no fato de o piloto possuir uma fase diferente de uma mesma seqüência PN (Pseudo Noise). Esta fase é um múltiplo inteiro

de um atraso conhecido pelo sistema. Cada base é, portanto, identificada pela mesma PN, porém, com fases diferentes [1].

No gerenciamento do processo de *soft handoff*, o móvel mantém em sua memória quatro listas de pilotos, com as informações de fase das seqüências PN das bases. As quatro listas são as seguintes:

- *Active Set* – contém os pilotos das BTSs que suportam a chamada naquele momento. São as BTSs que participam do processo de *soft handoff*. Quando existir somente uma BTS, o móvel não estará em *soft handoff*. A alteração do *active set* é feita pela BTS/BSC, enviando-se uma mensagem para o móvel;
- *Candidate Set* – contém os pilotos que não estão no *Active set*, mas possuem intensidade suficiente para suportar chamadas do móvel;
- *Neighbor Set* – são os pilotos que não estão em nenhum dos conjuntos anteriores e são prováveis candidatos ao *handoff*.
- *Remaining Set* – são todos os outros possíveis pilotos com a mesma frequência, excluindo-se os casos anteriores.

Em [6] é definido um outro conjunto de pilotos chamado *Discard Set*. Nesta categoria estão os pilotos das bases, que naquele momento, pertencem ao *active set* e estão em vias de deixar este conjunto, por não atenderem aos critérios para estar no *active set*. O *discard set* não está definido na IS-95A.

A BTS/BSC especifica, para cada conjunto de pilotos descrito acima, a janela de procura (*range of PN offsets*), na qual a estação móvel deve procurar as componentes de multipercurso, para demodular o canal direto de tráfego. As janelas de procura são especificadas pela IS-95A.

A mudança de categoria de piloto entre os *sets* é feita mediante a avaliação, por parte do móvel, da intensidade dos pilotos e a utilização de um conjunto de limiares. Este movimento de pilotos nos *sets* é coordenado com a BTS/BSC. A avaliação do móvel é feita comparando-se a intensidade entre os pilotos e, também, comparando-se a potência de cada piloto com a potência total recebida no enlace direto (*Forward Link*). Esta última comparação (normalização de intensidade de piloto) é a razão entre a energia de piloto em um *chip* e a densidade espectral total de potência de todo o *Forward Link*. A expressão (2.1) apresenta a relação entre a energia de *chip* e a densidade espectral total de potência de interferência, ou seja:

$$\left( \frac{E_c}{I_o} \right)_i = \frac{\mu P_i / W}{N_{th} + \sum_j P_j / W} \quad (2.1)$$

onde:  $E_c$  – energia de chip recebido do  $i$ -ésimo setor,

$I_o$  – densidade espectral de potência total dos interferentes,

$\mu$  – fração de potência do setor alocado ao sinal piloto,

$P_i$  – potência recebida do  $i$ -ésimo setor,

$W$  – largura de faixa do sistema e

$N_{th}$  – densidade espectral de potência de ruído térmico.

A mudança de status dos pilotos é feita utilizando-se níveis de comparação baseados na expressão (2.1). São definidos os seguintes limiares de  $E_c/I_o$  na IS-95A:

- T\_ADD – limiar de  $E_c/I_o$  para a inclusão de piloto no *candidate set*;
- T\_DROP – limiar de  $E_c/I_o$  para remoção de piloto do *active set*;
- T\_COMP – limiar de  $E_c/I_o$  de comparação entre pilotos do *active set* e *candidate set*.

Também é definido um limiar de tempo T\_TDROD para remoção de pilotos do *active set*. Após vencido este tempo, o piloto é removido do *active set*.

Pilotos no *neighbor set* ou no *remaining set*, cujo  $E_c/I_o$  exceda o limiar  $T\_ADD$ , são associados a células que podem suportar uma chamada. Estes pilotos são movidos pelo móvel para o *candidate set* e, em seguida, para o *active set*, após mensagem da BTS/BSC. Similarmente, pilotos no *candidate set*, cujo limiar permanecer abaixo do limiar  $T\_DROP$  por um período de tempo que exceda o parâmetro  $T\_TDROP$ , são removidos para o *neighbor set*. O parâmetro  $T\_TDROP$  tem como função evitar um efeito ping-pong de pilotos no *active set*. Nota-se que os pilotos no *active set* estão participando do *soft handoff* e a alteração de sua posição deve ser feita em conjunto com a BTS/BSC. Finalmente, um piloto no *candidate set*, cuja intensidade exceda a um piloto do *active set* por pelo menos  $T\_COMP \times 0,5$ , será movido para o *active set*.

Um móvel em *soft handoff* estará operando com duas ou mais BTSs, o que significa que uma só conversação estará ocupando dois ou mais recursos (códigos e modems). Este fato tem um impacto direto no planejamento do sistema. A condição de estar ou não em *soft handoff* depende diretamente das áreas de sobreposição. As áreas de sobreposição, por sua vez, dependem do ajuste dos parâmetros  $T\_ADD$ ,  $T\_DROP$  e  $T\_TDROP$ , considerando fixos os parâmetros de RF. O parâmetro  $T\_ADD$  está relacionado com a medida do  $E_c/I_o$ , pelo móvel, das BTSs com possibilidade para suportar o *soft handoff*. O  $T\_DROP$  está relacionado com a saída das BTSs do processo de *soft handoff*.

Para os sistemas FDMA e TDMA, é possível identificar as regiões de sobreposição. Uma vez especificados os parâmetros de RF e os parâmetros de sistema, as regiões de sobreposição ficam definidas. No sistema CDMA, estas regiões dependem basicamente da relação  $E_c/I_o$ , que, por sua vez, depende do número de usuários ativos no sistema, e dos limiares  $T\_ADD$  e  $T\_DROP$ . Pode-se perceber que o número de usuários ativos numa certa região pode alterar a relação  $E_c/I_o$ , estabelecendo, assim, uma diferente configuração de regiões de sobreposição.

A IS-95B [8] permite alteração dinâmica dos limiares, o que favorece a performance no caso de pilotos fracos serem adicionados ao *active set* com pilotos fortes. Na terceira

geração de sistemas móveis, que emprega WCDMA (Wideband CDMA) [6], a decisão para a realização de *handoff* irá necessitar de mais informações, tais como: atenuação em função da distância, interferência do enlace reverso, interferência do enlace direto, etc. Também o tráfego assimétrico e a carga no sistema são informações que devem ser levadas em consideração no processo de *handoff* em sistemas de terceira geração.

## **2.4 Capacidade do Sistema CDMA**

Em sistema CDMA, a questão a respeito da capacidade é motivo de muita controvérsia. Tanto a capacidade quanto a qualidade do sistema são limitadas pela interferência, ao contrário das outras técnicas de acesso, onde existe um valor que pode ser calculado e que determina a capacidade. Pode-se definir a capacidade do sistema como o número total de usuários que podem, simultaneamente, utilizar o sistema, mantendo um certo grau de qualidade. A qualidade está relacionada com a taxa de erro de bit, que depende das condições da ligação rádio. Alguns fatores que afetam a capacidade de um sistema CDMA são: a precisão do controle de potência, a interferência dos usuários da própria célula, a interferência dos usuários das células vizinhas, a interferência entre BTSs, etc. As condições de comunicação no enlace direto (base para móvel) e no enlace reverso (móvel para base) são diferentes, necessitando de tratamento diferente. Em geral, na literatura [1], utiliza-se o enlace reverso como o enlace limitante em termos de capacidade, já que o enlace direto utiliza o piloto e pode ser considerado como coerente.

O parâmetro básico para determinação do desempenho em transmissão digital é a razão  $E_b/N_o$  (energia de bit /densidade espectral de potência de ruído) que, por sua vez, estabelece a performance em termos de BER (Bit Error Rate) ou FER (Frame Error Rate), para um certo tipo de processamento (modulação, espalhamento, etc). Para determinar a capacidade de um sistema CDMA, partimos da relação  $E_b/N_o$ . A energia de bit é determinada pela relação [1]:

$$E_b = \frac{S}{R} \quad (2.2)$$

onde:  $S$  – potência média do sinal modulado e  
 $R$  – taxa de bits por segundo.

A densidade espectral de potência de ruído é dada pela relação:

$$N_o = \frac{N}{W} \quad (2.3)$$

onde :  $N$  – potência de ruído (no caso será a soma da potência dos outros usuários) e  
 $W$  – largura de faixa.

Substituindo em  $E_b/N_o$  temos:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{S}{N} \frac{W}{R} \quad (2.4)$$

O termo  $W/R$  é conhecido como ganho de processamento.

Para a análise feita aqui, considera-se um sistema com controle de potência ideal, onde a potência de todos os móveis na recepção da estação base é igual. Baseado nesta consideração a relação sinal ruído de um usuário pode ser expressa como:

$$\frac{S}{N} = \frac{1}{M - 1} \quad (2.5)$$

onde:  $M$  – número total de usuários presentes na faixa de frequência.

A expressão (2.5) considera que a potência total de interferência na faixa de frequência é igual à soma das potências de todos os usuários individuais menos um. Como a potência de todos os usuários é a mesma, devido ao controle de potência perfeito, a

relação sinal ruído será aquela apresentada pela expressão (2.5). Observar que não foram consideradas outras fontes de ruído, como, por exemplo, o ruído térmico.

Substituindo (2.5) em (2.4) chega-se à seguinte expressão:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{1}{M-1} \frac{W}{R} \quad (2.6)$$

A título de ilustração, seja o seguinte caso prático utilizado em sistemas CDMA, com as seguintes características:

$$W = 1,2288 \text{ MHz}$$

$$R = 9,6 \text{ kbps (i.e., correspondente ao vocoder de 8 kbps)}$$

$$E_b/N_o = 5,01 \text{ (i.e., 7 dB)}$$

Utilizando-se em (2.6) os valores apresentados, chega-se a um número de 26 canais/célula/portadora, o que significa até 26 conversações simultâneas para atender ao  $E_b/N_o$  especificado.

No sistema CDMA prático, é necessário levar em consideração outros fatores que irão diminuir este número de canais. O primeiro fator relaciona-se com o efeito de carregamento do sistema, que leva em consideração a presença de outras células, além da célula analisada. Estas outras células vão contribuir com interferência na célula analisada em função do fator de reuso  $\eta$ . Para considerar este fator de carregamento, a expressão (2.6) deve ser alterada da seguinte maneira [1]:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{1}{M-1} \frac{W}{R} \left( \frac{1}{1+\eta} \right) \quad (2.7)$$

onde  $\eta$  é o fator de carregamento. A expressão  $1/(1+\eta)$  é chamada de eficiência de reuso de frequência, denotado como  $F$ . O valor ideal para  $F$  é 1, para o caso de uma única célula. O

fator  $F$  será menor que 1 na presença de células vizinhas. Um valor típico para o fator de reuso é  $F=0,6$ , obtendo um fator de carga de  $\eta=0,6667$ .

Outro fator diz respeito ao ganho de setorização  $\lambda$ , que considera o fato da interferência de usuários de outras células diminuir quando se utiliza setorização. O valor típico para três setores é  $\lambda=2,5$ . Assim, obtém-se a seguinte expressão:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{1}{M-1} \frac{W}{R} F\lambda \quad (2.8)$$

A expressão (2.8) considera que o usuário transmite durante 100% do tempo. Na prática o codificador de voz utilizado na IS-95 possibilita taxa variável. Este codificador de voz permite que a taxa de saída seja ajustada de acordo com o padrão de voz do usuário, reduzindo, assim, a taxa quando não existe atividade de voz. Este fator de atividade de voz  $v$  tem como valor típico 0,5, ou seja, 50% de atividade de voz. O efeito desta atividade de voz no sistema é a redução da interferência total. Portanto, levando-se em consideração este outro fator, chega-se à seguinte expressão:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{1}{M-1} \frac{W}{R} \frac{F\lambda}{v} \quad (2.9)$$

O último fator a ser considerado é a eficiência do controle de potência  $P$ , o qual reflete a imperfeição no controle de potência, o que afeta a capacidade do sistema. O valor típico para este fator é 0,7. Desta forma, considerando, também, a eficiência do controle de potência, tem-se a expressão:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{1}{M-1} \frac{W}{R} \frac{F\lambda P}{v} \quad (2.10)$$

Trabalhando a expressão (2.10), obtém-se a expressão para determinação do número de usuários simultâneos, ou número de canais/setor/portadora, como é mostrado a seguir:

$$M = \frac{\frac{W}{R} F\lambda P}{\frac{E_b}{N_o} \nu} + 1 \quad (2.11)$$

Utilizando (2.10) e considerando os valores típicos apresentados anteriormente, chega-se a um número de 54 canais/célula/portadora ou 18 canais/setor/portadora. Estes valores, que são típicos, serão utilizados para o desenvolvimento do trabalho como a condição em que a interferência pode ser desconsiderada, ou seja, para até 18 canais ocupados no setor pode-se desconsiderar a interferência causada por outros usuários.

Como pode ser observado em (2.11), a capacidade é diretamente proporcional ao ganho de processamento e inversamente proporcional ao  $E_b/N_o$ . Ou seja, quanto maior o  $E_b/N_o$  menor será a capacidade do sistema e melhor a FER (frame error rate). Deve haver um compromisso entre capacidade e qualidade do sistema.

O *soft handoff* provê um ganho de diversidade, tanto no enlace direto quanto no enlace reverso, permitindo que o móvel transmita com menor potência. Assim, o controle de potência e o *soft handoff* trabalham em conjunto, reduzindo a interferência e provocando uma tendência de aumento de capacidade. Como já comentado anteriormente, a utilização de mais de uma base para uma só conversação reduz a capacidade, caso não seja feito um planejamento adequado. Portanto, é necessária uma sistemática de dimensionamento do sistema que considere a necessidade de existirem canais para atender ao *soft handoff*. Por outro lado, quanto maior a região de sobreposição maior será a probabilidade de móveis em *soft handoff*, que conseqüentemente afetará a capacidade do sistema. No presente trabalho, joga-se justamente com estas condições propondo, assim, uma sistemática de dimensionamento.

## 2.5 Técnicas de Planejamento em Uso

As estratégias de planejamento propostas na literatura para o dimensionamento do número de canais em uma célula, são bastante diferentes entre si no que diz respeito aos parâmetros utilizados. Uma estratégia considera as proporções das áreas de sobreposição para determinar o tráfego aparente e o tráfego real. O tráfego aparente é aquele pelo qual o sistema pode cobrar do usuário. O tráfego real é aquele efetivamente tratado pelo sistema. Outra estratégia considera a interferência como fator preponderante, que limita a capacidade.

Neste item são apresentadas as duas técnicas comumente utilizadas para o dimensionamento de sistemas CDMA. Antes, porém, baseado em [9], estima-se a proporção de sobreposição entre células, parâmetro crítico no planejamento de sistema.

### 2.5.1 Proporção de Sobreposição de Três Células

As células de sistemas móveis não são definidas claramente, tendo limites confusos devido à flutuação estatística das perdas de propagação. Se as estações móveis estão próximas à borda da célula, elas podem ter comunicação adequada com mais de uma base. A proporção de célula, dentro da qual o móvel tem mais que um caminho rádio, depende da distribuição de desvanecimento, da tolerância permitida na perda de percurso para uma comunicação satisfatória e na distribuição geográfica das células e dos móveis.

Além da sobreposição natural entre células, áreas comuns entre células devem ser previstas de forma a tornar possível o *handoff*. Vários trabalhos [9-12] sugerem modelos de sobreposição entre três células. Neste modelos,  $\gamma$  representa a proporção de tráfego com acesso a duas ou mais bases, onde  $\delta$  representa a proporção de tráfego com acesso a três ou mais bases e  $\gamma - \delta$  representa a proporção de tráfego com acesso a até duas bases. Chamando de  $w_1$ ,  $w_2$  e  $w_3$  as potências recebidas pelo móvel das bases 1, 2 e 3, respectivamente, podem ser calculados os valores de  $\gamma$  e  $\delta$ , para um determinado valor de

limiar, definido como sendo um valor menor ou igual a  $|w_1 - w_2|$ , a partir das equações integrais:

$$\gamma = \frac{1}{area} \iint_{area} \iint_{|w_1 - w_2| \leq \text{limiar}} p(w_1, w_2, x, y) dw_1 dw_2 dx dy \quad (2.12)$$

onde,  $p(w_1, w_2, x, y)$  é a densidade de probabilidade conjunta dos sinais com potência  $w_1$  e  $w_2$  no ponto  $(x, y)$ ; da mesma forma:

$$\delta = \frac{1}{area} \iint_{area} \iiint_{|w_i - w_j| \leq \text{limiar}} p(w_1, w_2, w_3, x, y) dw_1 dw_2 dw_3 dx dy \quad (2.13)$$

onde  $i$  e  $j$  assumem, respectivamente, em seqüência, os valores 1,2,3 e 2,3,1.

A Figura 2.2 ilustra estes parâmetros nas regiões correspondentes.

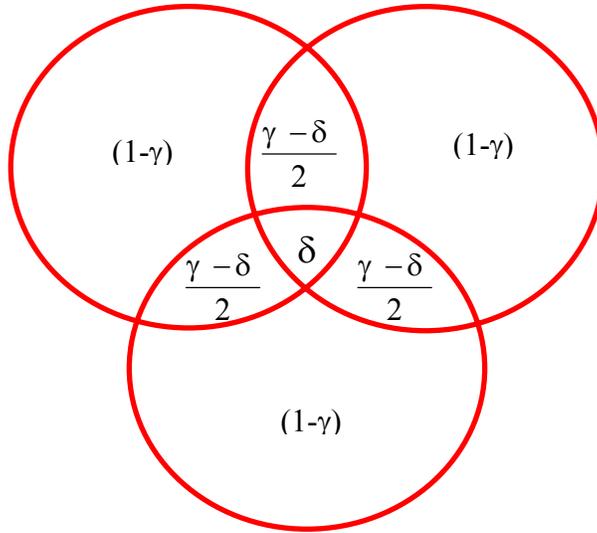


Figura 2.2 – Proporção de tráfego em células sobrepostas

As proporções  $\gamma$  e  $\delta$  foram determinadas em [9-12] para os ambientes Lognormal, Rayleigh, Rice, Nakagami e para as versões sombreadas. Em particular, as Figuras 2.3 e 2.4 mostram estas proporções para ambiente Lognormal, em função do limiar  $A$  [dB], com

desvio padrão de 5 dB, considerando alguns valores para o coeficiente de perda de percurso  $\alpha$ , que depende da topografia do terreno.

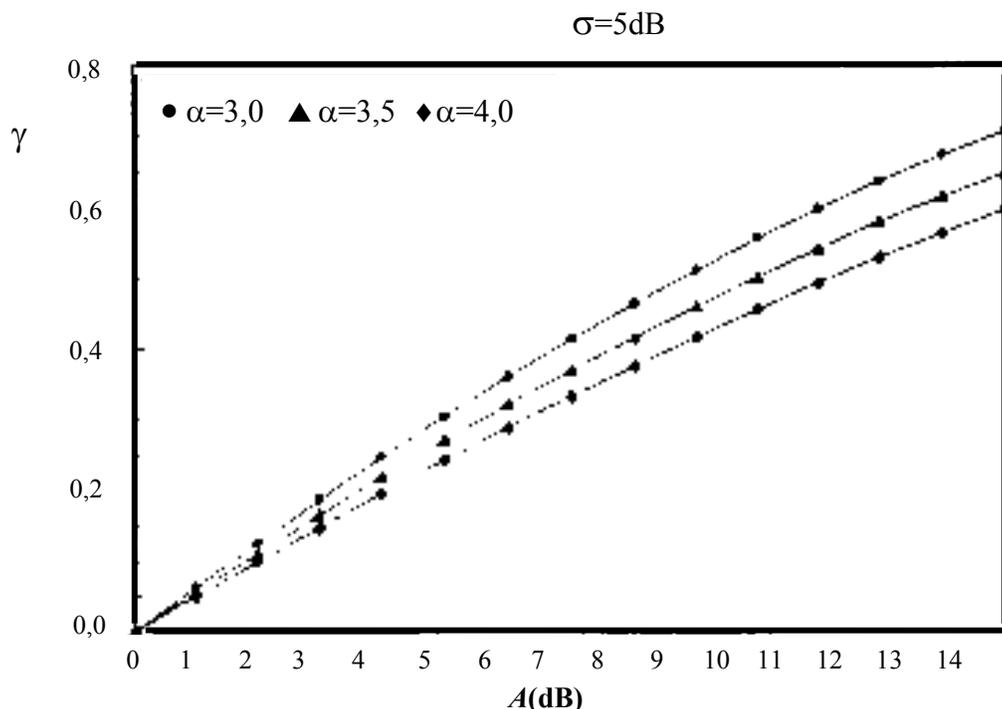


Figura 2.3 - Proporção de área de sobreposição entre duas células

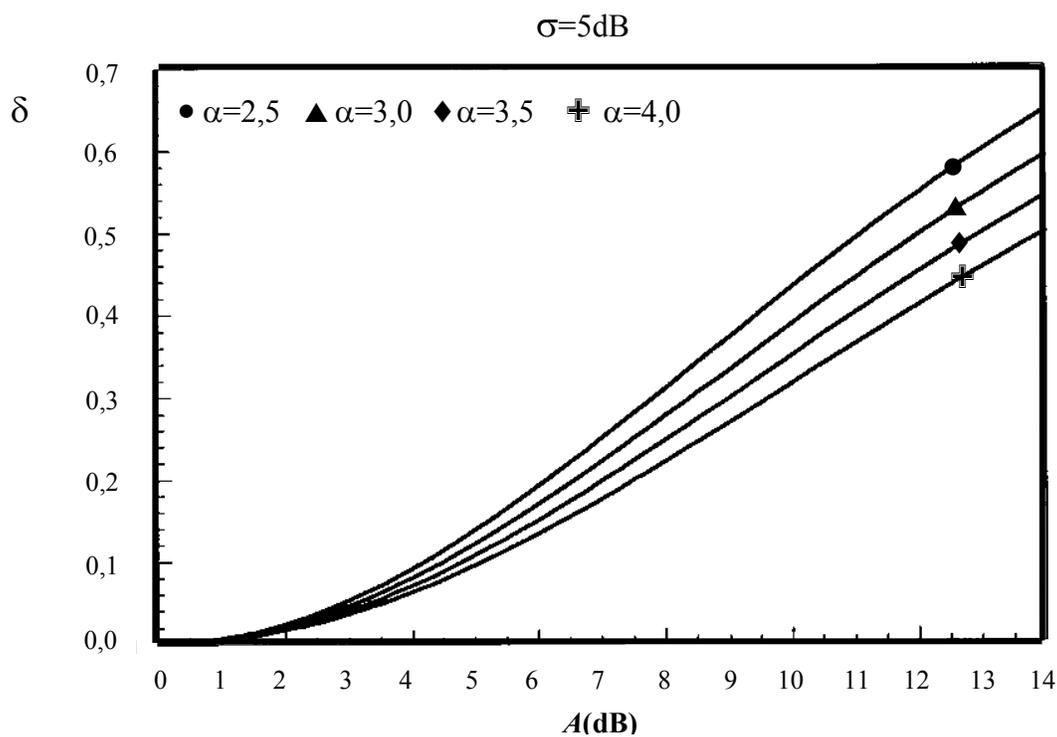


Figura 2.4 – Proporção de área de sobreposição entre três células

Uma conclusão importante destes trabalhos [9-12] é que a proporção  $\delta$  pode ser escrita em função de  $\gamma$ , como aproximadamente:

$$\delta = k\gamma^2, \quad k > 0 \quad (2.14)$$

onde  $k$  é uma constante.

Este resultado será utilizado mais adiante no desenvolvimento da técnica de planejamento proposta para três células.

### 2.5.2 Planejamento Utilizando Fator de Redução

Nesta metodologia, utilizam-se os conceitos de tráfego aparente e tráfego real. Como já se expôs, o tráfego aparente é aquele pelo qual o sistema pode cobrar o usuário e o tráfego real, por sua vez, é aquele efetivamente tratado pelo sistema. Um usuário, na condição de *soft handoff*, utiliza mais recursos do que um mínimo necessário, porém, não poderá pagar pelo excesso de recurso utilizado, por se encontrar na condição de *soft handoff*. O dimensionamento de canais, para satisfazer a condição de *soft handoff*, utiliza o fator de carga dado pela razão entre a carga real e a carga aparente. A carga real é, então, determinada multiplicando-se o fator de carga pela carga aparente. Com a carga real determinada, encontra-se o número de canais na célula utilizando alguma abordagem que leve em consideração a situação de *soft handoff*.

Uma primeira maneira de determinar o número de canais para realização do *soft handoff*, utiliza uma abordagem convencional. Determinado o número de canais por célula ou setor, de acordo com a expressão (2.11), este número representará o número máximo de usuários transmitindo simultaneamente na célula, considerando também os usuários em condição de *soft handoff*. Para efeito de dimensionamento de tráfego, o número de canais deverá ser reduzido pelo fator  $f$ . A obtenção deste fator utiliza a Figura 2.2, levando-se em consideração as regiões de sobreposição. Este fator é obtido pela seguinte expressão:

$$f = \frac{3(1-\gamma) + 3\left(\frac{\gamma - \delta}{2}\right) + \delta}{3} \quad (2.15)$$

Trabalhando-se essa expressão, tem-se:

$$f = 1 - \frac{\gamma}{2} - \frac{\delta}{6} \quad (2.16)$$

Segundo a referência [9], para sistemas operando sem controle de potência, o limiar ótimo de *handoff* situa-se na faixa de 4 a 6 dB, enquanto que, com controle de potência, este limiar fica entre 2 e 3 dB. Observa-se que quanto maior o limiar de *handoff* maior é a área de sobreposição entre células. Adotando-se, por exemplo, o valor prático de limiar igual a 6 dB obtém-se, utilizando (2.16), um fator de carga de 0,7666..., para  $\gamma = 40\%$  e  $\delta = 20\%$ .

Desta forma, o número de canais para dimensionamento de tráfego, utilizando o resultado de 18 canais/setor/portadora obtido na seção 2.4, obtém-se o seguinte número de canais:

$$N_{\text{Tráfego}} = 18 \cdot 0,766 \cong 14$$

Já o número de canais para cursar o tráfego devido ao *soft handoff* é obtido fazendo-se a diferença, ou seja:

$$N_{\text{handoff}} = 18 \cdot (1-f) = 4$$

Uma outra abordagem para determinar o número de canais, utiliza uma abordagem estatística. O tráfego oferecido em uma célula, ou setor, de um sistema CDMA é determinado conhecendo-se o número de canais daquela célula (setor) e utilizando-se a

fórmula de Erlang-B para uma determinada probabilidade de bloqueio. A fórmula de Erlang-B é a seguinte [14]:

$$E(A, N) = \frac{A^N / N!}{\sum_{i=0}^N A^i / i!} \quad (2.17)$$

onde:  $E(A, N)$  – probabilidade de bloqueio,  
 $A$  – tráfego oferecido e  
 $N$  – número total de canais.

Além do próprio tráfego, a célula, ou setor, também deverá cursar o tráfego devido ao *soft handoff*. Desta forma, a proporção de aumento do tráfego pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$g = \frac{\iint_{A_1} \rho(x, y) dx dy + 2 \times \iint_{A_2} \rho(x, y) dx dy + 3 \times \iint_{A_3} \rho(x, y) dx dy}{\iint_{A_1+A_2+A_3} \rho(x, y) dx dy} \quad (2.18)$$

onde:  $\rho(x, y)$  é a densidade de tráfego nas coordenadas  $(x, y)$ ,

$A_1$  é a região onde o tráfego tem acesso à própria célula,

$A_2$  é a região onde o tráfego tem acesso a duas células e

$A_3$  é a região onde o tráfego tem acesso a três células.

A proporção de tráfego  $g$  também pode ser obtido diretamente da Figura 2.2, como na expressão abaixo:

$$g = (1 - \gamma) + 2 \times 2 \left( \frac{\gamma - \delta}{2} \right) + 3\delta \quad (2.19)$$

Assim,

$$g = 1 + \gamma + \delta \quad (2.20)$$

A mesma proporção pode ser obtida, também, através de um outro método. Seja  $A_I$  o tráfego total da célula 1 e  $A_{Ii}$  o tráfego interno (sem *handoff*) da célula  $i$  ( $i=1,2,3$ ); da Figura 2.2 chega-se à seguinte expressão:

$$A_1 = A_{I1} + A_{I2} \left( \frac{\gamma - \delta}{2} \right) + A_{I3} \left( \frac{\gamma - \delta}{2} \right) + \delta A_{I2} + \delta A_{I3} \quad (2.21)$$

Supondo tráfego igual em todas as células ( $A_{I1} = A_{I2} = A_{I3}$ ), obtém-se o tráfego na célula 1, dado por:

$$A_1 = A_{I1} (1 + \gamma + \delta) \quad (2.22)$$

De uma forma geral,

$$A = A_I g \quad (2.23)$$

ou

$$A_I = g^{-1} A \quad (2.24)$$

onde:  $A$  – tráfego total da célula,

$A_I$  – seu tráfego interno e

$A_H = A - A_I$  – tráfego de *soft handoff*.

Para efeito de dimensionamento, o tráfego na célula deverá ser reduzido de um fator  $g^{-1}$ .

A título de ilustração, serão utilizados os valores já obtidos anteriormente, isto é,  $N=18$  canais. Para 18 canais e um bloqueio de 2%, da fórmula de Erlang-B obtém-se um tráfego de 11,5 erlangs. Adotando-se para os parâmetros  $\gamma$  e  $\delta$  os mesmos utilizados anteriormente, isto é,  $\gamma=40\%$  e  $\delta=20\%$ , obtém-se, utilizando (2.20):

$$g=1,6 \quad \text{e} \quad g^{-1}=0,625$$

Com estes valores, o tráfego interno será  $A_I=0,625 \times 11,5=7,1875$  erlangs. Para uma probabilidade de bloqueio de 2%, o número de canais correspondente é de 13, o que dá 5 canais para cursar o tráfego de *soft handoff*. É importante observar a proximidade entre os resultados obtidos pelas abordagens convencional e estatística.

Em resumo, esta técnica trabalha com um fator de redução que deve ser aplicado para atender ao tráfego de *soft handoff*. Salienta-se que foi levada em consideração somente a proporção de área de sobreposição e que esta condição somente se aplica a sistemas CDMA. Parte-se do tráfego real para se chegar ao tráfego aparente utilizando o fator de redução. Vale ressaltar, entretanto, que nada se diz a respeito das probabilidades de canais ocupados, tampouco sobre o bloqueio de *soft handoff*. Embora bastante simples, esta técnica é utilizada comumente no planejamento de sistemas CDMA.

### 2.5.3 Planejamento Utilizando Limite de Interferência

O planejamento utilizando limite de interferência, considera uma degradação da qualidade tendo em vista o aumento do número de usuários ativos, chegando a um limite que impede a comunicação pela alta FER (*Frame Error Rate*). O enlace reverso é o que apresenta maior limitação com relação à interferência, sendo, portanto, o enlace utilizado para esta análise.

Para realizar o planejamento, é introduzido o conceito de *soft blocking* [1], onde considera-se uma condição de degradação suave devido ao aumento da interferência. Esta sistemática de planejamento é apresentada primeiramente, utilizando um modelo simplificado e, em seguida, uma abordagem mais sofisticada.

O *soft blocking*, como apresentado por [1], ocorre quando o nível total de interferência excede ao nível de ruído de fundo (*background noise*) por um valor pré-

determinado  $1/r$ . A interferência total é calculada considerando a interferência produzida dentro da própria célula, a interferência produzida por outras células e o ruído térmico.

A análise simplificada considera um número constante de usuários na célula, um controle de potência perfeito e o mesmo requisito de  $E_b/N_o$  para todos os usuários. Nestas condições, o total de interferência é obtido pela seguinte expressão:

$$I_{total} = M(E_b R) + \eta M(E_b R) + N_{th} \quad (2.25)$$

onde:  $M$  – número de usuários,

$E_b$  – energia por bit do sinal,

$R$  – taxa de dados,

$\eta$  – fator de carga representando a razão entre a interferência introduzida pelos móveis servidos por outras células e a interferência introduzida pelos móveis servidos pela própria célula e

$N_{th}$  – potência de ruído térmico.

Manipulando a expressão (2.25), chega-se à seguinte expressão:

$$I_{total} = ME_b R(1 + \eta) + N_{th} \quad (2.26)$$

O *soft blocking* ocorrerá quando o nível total de interferência exceder ao nível do *background noise* por um valor pré-determinado  $1/r$ . Assim, a condição para não se ter o *soft blocking* será:

$$I_{total} \geq ME_b R(1 + \eta) + N_{th} \quad (2.27)$$

Define-se o fator  $r$ , que relaciona o ruído térmico com a interferência total, pela seguinte expressão:

$$r = \frac{N_{th}}{I_{total}} \quad (2.28)$$

Substituindo-se (2.28) em (2.27) e considerando  $I_{total} = I_o W$ , chega-se à expressão que determina o número máximo de usuários possíveis, por considerar o limite de interferência. Esta expressão é a seguinte:

$$M \leq \left( \frac{W/R}{E_b/I_o} \right) \left( \frac{1-r}{1+\eta} \right) \quad (2.29)$$

Porém, como já mencionado, é necessário assumir certas condições que tornam este limite de usuário bastante irreal como valor para planejamento. Deve-se considerar que o número de usuários ativos no sistema atende a uma distribuição de Poisson. A atividade de voz é outro fator que deve ser considerado, para tanto, deve ser modelada com uma probabilidade  $v$  e a probabilidade de usuário não ativo com uma probabilidade  $(1-v)$ . Como consideração final, cada usuário pode requerer um  $E_b/N_o$  diferente para obter uma certa taxa de erro desejável. Utilizando as considerações, chega-se à seguinte expressão [1]:

$$I_{total} \geq \sum_{i=1}^m \pi_i E_{b,i} R + \sum_{j=1}^{K-1} \sum_{i=1}^m \pi_{ij} E_{b,ij} R + N_{th} \quad (2.30)$$

onde:  $m$  – número de usuários por setor, seguindo uma distribuição de Poisson,

$\pi_i$  – variável aleatória devido à atividade de voz do móvel  $i$  no setor local valendo 1, com probabilidade  $v$ , para móvel ativo e 0, com probabilidade  $(1-v)$ , para móvel não ativo,

$\pi_{ij}$  – variável aleatória devido à atividade de voz do móvel  $i$  no setor  $j$ , valendo 1, com probabilidade  $v$ , para móvel ativo e 0, com probabilidade  $(1-v)$ , para móvel não ativo,

$E_{b,i}$  – energia por bit do móvel  $i$  no setor local,

$E_{b,ij}$  – energia por bit do móvel  $i$  no setor  $j$  e

$K$  – número de setores.

A expressão (2.30) mostra a interferência, tanto do setor local quanto dos  $K-1$  setores próximos. Manipulando-se a expressão (2.30), chega-se à seguinte expressão:

$$(W/R)(1-r) \geq \sum_{i=1}^m \pi_i \left( \frac{E_{b,i}}{I_o} \right) + \sum_{j=1}^{K-1} \sum_{i=1}^m \pi_{ij} \left( \frac{E_{b,ij}}{I_o} \right) \quad (2.31)$$

É importante observar que  $m$ ,  $\pi$  e  $E_b/N_o$  são variáveis aleatórias e, portanto, a expressão (2.31) pode ser tratada como uma variável aleatória  $Z$ . A probabilidade de bloqueio pode ser escrita como:

$$P(\text{blocking}) = P[Z > (W/R)(1-r)] \quad (2.32)$$

A expressão (2.32) é de difícil avaliação e é possível mostrar [1] que uma aproximação pode ser obtida conforme expressão a seguir:

$$\text{Tráfego Oferecido} = \frac{(W/R)(1-r)}{(E_b/I_o)v(1+\eta)} F(B, \sigma) \quad (2.33)$$

onde:  $v$  – fator de atividade de voz.

O valor de  $F(B, \sigma)$  é obtido pela seguinte expressão [3]:

$$F(B, \sigma) = \frac{1}{\alpha} \left[ 1 + \frac{\alpha^3 B}{2} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{4}{\alpha^3 B}} \right) \right] \quad (2.34)$$

onde:  $\alpha = \exp(\beta^2 \sigma^2 / 2)$ ,

$\sigma$  – desvio padrão do controle de potência do enlace reverso e

$$\beta - 0,2303 = \ln(10)/10.$$

O valor de  $B$  é obtido pela seguinte expressão:

$$B = \frac{(E_b / I_o)[Q^{-1}(P(\text{blocking}))]^2}{(W / R)(1 - r)} \quad (2.35)$$

onde  $Q^{-1}(z)$  é a função inversa de  $Q(z)$ , dada por:

$$Q(z) = \left( \int_z^\infty e^{(-x^2)/2} dx \right) / (\sqrt{2\pi}) \quad (2.34)$$

Determinado o tráfego oferecido, pode-se obter o número de canais para uma certa probabilidade de bloqueio, utilizando a fórmula de *Erlang-B*. Como exemplo, considere os seguintes parâmetros [1]:

$$W = 1,25 \text{ MHz,}$$

$$R = 9,6 \text{ kbps,}$$

$$1/r = 10,$$

$$\sigma = 2,5 \text{ dB ou } 1,778,$$

$$\eta = 0,55 - \text{fator de carga de outras células,}$$

$$\text{Desejada probabilidade de } \textit{soft} \text{ blocking} = 0,01,$$

$$E_b/N_o = 5,01 \text{ (i.e., } 7 \text{ dB) e}$$

$$v = 40\% \text{ ou } 0,4.$$

Utilizando-se as expressões apresentadas, chega-se a um tráfego oferecido de 20,2 erlangs. Considerando um bloqueio de 2%, encontra-se, utilizando a tabela de *Erlang-B*, um valor de 29 canais.

A determinação do número de canais, como pode ser visto acima, fica dependente de variáveis aleatórias com médias e desvio padrão que são definidas ou medidas ou determinadas empiricamente. Não é tarefa fácil chegar a valores confiáveis na determinação do número de canais. Por este motivo, são mais utilizados procedimentos mais simples, como os apresentados na seção 2.5.2, que, embora apresentem resultados sem considerações mais aprofundadas, podem ser aplicados mais facilmente, sendo corrigidos no dia-a-dia do sistema.

## **2.6 Conclusão**

As metodologias de planejamento apresentadas ou são muito simples, não atendendo a características importantes, ou são muito complexas e, por isso, de difícil aplicação. A metodologia, que utiliza o tráfego aparente e o tráfego real, não considera a questão de interferência que ocorre no sistema CDMA no processo de *soft handoff*. Porém, esta proposta é extremamente simples de ser utilizada, o que a torna muito popular em planejamentos práticos.

A metodologia que emprega a avaliação da interferência para determinação do tráfego oferecido, permitindo avaliar a capacidade, utiliza vários dados aleatórios e, assim, muitas considerações são necessárias para obter-se uma expressão que possa ser prática. Muitos dos valores para a realização dos cálculos devem ser arbitrados, criando assim dificuldades que tornam esta metodologia não prática para ser empregada em planejamento.

Nenhuma das metodologias apresentadas anteriormente leva em consideração o bloqueio de *soft handoff*, o qual deve ser levado em consideração, pois representa também um parâmetro a ser definido e, mesmo, planejado no sistema.

Salienta-se que a metodologia proposta neste trabalho é simples e de fácil aplicação no dimensionamento de canais de *soft handoff*, pois leva em conta tanto a questão do bloqueio de *soft handoff* quanto a influência destes canais na interferência, chegando à

definição de uma probabilidade de outage, que é utilizada para dimensionar o sistema em função das probabilidades dos eventos.



## 3 Considerações Sobre Duas Células

### 3.1 Introdução

Neste capítulo desenvolve-se um modelo teórico, aplicável a duas células, para o cálculo das probabilidades de bloqueio de *soft handoff* e *outage*, a serem definidas adiante. Estas probabilidades são utilizadas no método de planejamento proposto por este trabalho. O arranjo de duas células não encontra aplicação prática direta em sistemas celulares, porém, sua análise tem por objetivo demonstrar o princípio da técnica aqui proposta para o planejamento e, assim, consolidar os conceitos. No Capítulo 4, toda a análise feita para duas células será estendida para três células, possibilitando a generalização da técnica para qualquer número de células.

O objetivo é determinar as probabilidades envolvidas na operação de *soft handoff* no sistema celular CDMA, o que é de interesse para o trabalho. Estas probabilidades são: probabilidade de bloqueio de *soft handoff* e probabilidade de *outage*. Com a determinação destas probabilidades, é possível avaliar a eficiência do sistema na operação de *soft handoff* e, conseqüentemente, criar mecanismos para a realização do planejamento. Um parâmetro fundamental utilizado para a determinação destas probabilidades é o comportamento de tráfego na célula. Primordialmente, considera-se a distribuição de *Erlang-B* para análise. Alternativamente, a distribuição *Binomial* também será utilizada. A utilização de *Binomial* implica em menor tempo de processamento computacional pela menor complexidade das expressões, importante para sistemas de grande porte. As duas distribuições são comparadas mostrando-se, assim, que é possível a utilização da distribuição *Binomial*, principalmente para proporção de sobreposição entre células menor que 50%.

Antes de entrar propriamente no cálculo das probabilidades de *soft handoff* e *outage*, é necessário determinar a distribuição de canais ativos na região de sobreposição entre duas células. Este cálculo é a base para a determinação das probabilidades envolvidas no caso de duas células. A seguir, são determinadas as probabilidades de bloqueio de *soft handoff* e *outage*. A probabilidade de bloqueio de *soft handoff* significa a chance de um usuário não

conseguir entrar em *soft handoff* por falta de canais destinados para este fim. Por sua vez, a probabilidade de *outage* significa a chance de o número de canais ativos ultrapassar um certo limite de canais, acima do qual a interferência ultrapassa aquela especificada para o sistema. Estas duas probabilidades formam a base para o método de planejamento proposto.

### **3.2 Distribuição de Canais Ativos na Região de Sobreposição**

Como já se sabe, num sistema celular, os limites de fronteiras entre células não são rígidos, existindo regiões de sobreposição. A dimensão desta sobreposição é determinante no planejamento de sistemas CDMA, pois ela tem uma implicação direta no dimensionamento de canais para o atendimento do tráfego de *soft handoff*. Quanto maior a região de sobreposição maior será a probabilidade de existirem canais ativos nesta região. É necessário, portanto, determinar a probabilidade de canais ativos na região de sobreposição, uma vez que desta probabilidade dependerá todo o planejamento proposto.

Seja  $k$  o número de canais ativos na região de sobreposição entre duas células, estando ativos  $n$  canais na célula analisada, os quais obedecem a uma certa distribuição. Esta distribuição é representada, costumeiramente, por uma distribuição de *Erlang-B*. Será também considerada a distribuição *Binomial* como uma solução alternativa para representar este comportamento, que permite menor tempo computacional. No processo de planejamento, será possível escolher a distribuição de tráfego mais conveniente.

Como modelo básico para demonstração do princípio de planejamento, serão utilizadas duas células circulares com mesma área, distribuição uniforme de tráfego e uma proporção de sobreposição  $\gamma$  entre as células, como mostrado na Figura 3.1. Desta forma, será determinada a probabilidade de encontrar-se um certo número de canais ativos na região de sobreposição.

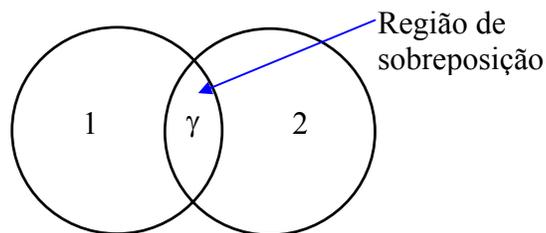


Figura 3.1 - Sobreposição entre duas células

Nesta análise, considera-se a célula 1 como referência e a célula 2 como alvo. Dada uma certa proporção de sobreposição  $\gamma$ , determina-se a probabilidade de canais ativos na região de sobreposição. Estes canais ativos na região de sobreposição estarão em situação de *soft handoff* com a outra célula, neste caso, a célula 2. Sendo assim, a célula alvo deverá ter seu dimensionamento dependente desta probabilidade de canais ativos que, por sua vez, depende da proporção da região de sobreposição  $\gamma$ . Como o modelo adotado considera células com mesma área e densidade de tráfego uniforme, existe para este caso uma simetria, ou seja, a solução encontrada para uma célula será a mesma para a outra célula.

Para a análise será considerada célula com  $N$  canais disponíveis. A região de sobreposição  $\gamma$  é uma porcentagem da área total da célula. Analisando esta célula e a região de sobreposição e considerando  $n$  canais ativos na célula 1, pode-se calcular a probabilidade  $p_k$  de estarem  $k$  canais ativos na região de sobreposição. Certamente esta probabilidade dependerá do percentual  $\gamma$  que a região de sobreposição representa em relação à área total da célula. Para o cálculo da probabilidade  $p_k$ , parte-se do cálculo da probabilidade  $p_n(k)$ :

$$p_n(k) \equiv \text{prob}\{k \text{ canais ativos na região de sobreposição para } n \text{ canais ativos na célula}\} \quad (3.1)$$

onde  $0 \leq k \leq n$ .

A probabilidade  $p_{k|n}$  representa a probabilidade de existirem  $k$  canais ativos na região de sobreposição de proporção  $\gamma$  para  $n$  canais ativos na célula. A variável  $n$  é aleatória e depende da distribuição de tráfego na célula 1. Supondo os assinantes uniformemente distribuídos na célula, a probabilidade de o assinante se encontrar na região de sobreposição é diretamente dada por  $\gamma$ . Para  $n$  canais ativos, a probabilidade de se terem  $k$ ,  $0 \leq k \leq n$ , canais ativos na região de sobreposição, é dada pela distribuição *Binomial* tal que:

$$p_{k|n} = \binom{n}{k} \gamma^k (1-\gamma)^{n-k} \quad (3.2)$$

Esta expressão calcula, para uma certa proporção de sobreposição  $\gamma$ , a probabilidade de  $k$  canais ativos na região de sobreposição para  $n$ ,  $0 \leq n \leq N$ , canais ativos na célula em  $N$  canais. O interesse é calcular, portanto, a probabilidade de existirem  $k$  canais ativos na região de sobreposição, ou seja:

$$p_k \equiv \text{prob}\{k \text{ canais ativos na região de sobreposição}\} \quad (3.3)$$

Para encontrar esta probabilidade, tem-se que considerar a probabilidade de canais ativos  $p_n$  na célula, que é a probabilidade de  $n$  canais ativos na célula 1, a qual estabelece o comportamento de tráfego na célula. Para se calcular  $p_k$ , deve-se ponderar cada situação pela probabilidade de canais ativos na célula, como abaixo:

$$p_k = \sum_{n=k}^N p_{k|n} p_n \quad (3.4)$$

onde  $N$  é o número de canais disponíveis na célula e  $p_n$  é a probabilidade de  $n$  canais ativos na célula 1. A probabilidade  $p_k$  depende do comportamento de tráfego a ser considerado na célula. Para o cálculo desta probabilidade, são consideradas as distribuições de *Erlang-B* e *Binomial*, o que será demonstrado a seguir:

### 3.2.1 Cálculo de $p_k$ para distribuição de *Erlang-B*

Na análise de tráfego em sistemas móveis, utilizam-se, como na rede fixa, chamadas com chegadas descritas por *Poisson* e tempo de retenção com distribuição segundo uma exponencial negativa. A chamada é perdida quando todos os canais estão ocupados. Para estas condições, a probabilidade de  $n$  canais ativos na célula para  $N$  canais disponíveis e tráfego oferecido  $A$ , é dada por:

$$p_n = \frac{A^n / n!}{\sum_{i=0}^N A^i / i!} \quad (3.5)$$

onde:  $p_n$  – probabilidade de  $n$  canais ativos na célula,  
 $A$  – tráfego oferecido e  
 $N$  – número de canais.

Para  $n=N$ , obtém-se a probabilidade de bloqueio de chamada, também obtida pela tabela de *Erlang-B*. Define-se, desta forma, a Expressão (3.5) como a distribuição de *Erlang-B*. A Figura 3.2 apresenta o comportamento desta distribuição mostrando a probabilidade de ocupação em função do número de canais para  $N=18$  e  $A=11,5$ . Pode-se observar que, para  $N=18$ , a probabilidade de ocupação é 0,02, ou seja, 2%, que é o valor obtido na tabela de *Erlang-B*.

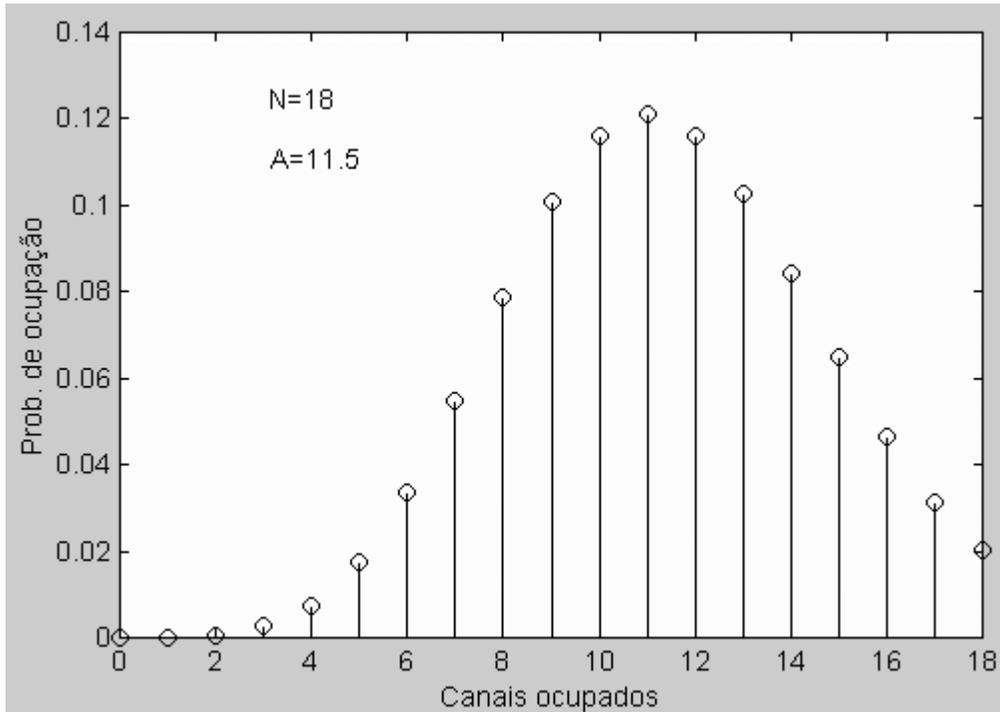


Figura 3.2 – Probabilidade de Ocupação

Substituindo as Expressões (3.2) e (3.5) em (3.4), chega-se à expressão da probabilidade de canais ativos na região de sobreposição:

$$p_k = \sum_{n=k}^N \binom{n}{k} \gamma^k (1-\gamma)^{n-k} \left( \frac{A^n / n!}{\sum_{i=0}^N A^i / i!} \right) \quad (3.6)$$

A probabilidade de canais ativos na região de sobreposição pode ser avaliada nos moldes do gráfico 3.2, ou seja, plotando esta probabilidade em função do número de canais na célula para uma certa região de sobreposição. A Figura 3.3 apresenta o gráfico da probabilidade  $p_k$  para uma região de sobreposição de 40%, 18 canais e tráfego de 11,5 Erlangs.

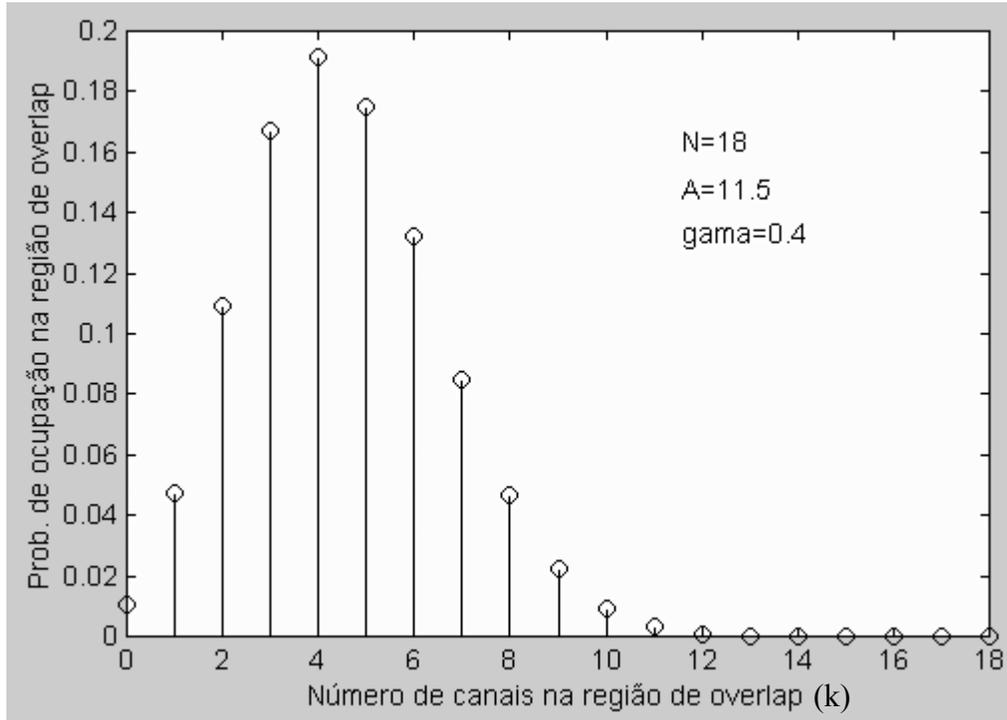


Figura 3.3 – Probabilidade de ocupação na região de sobreposição

O número médio de canais ocupados na região de sobreposição é calculado pela seguinte expressão:

$$E\{\text{canais ocupados em } \gamma\} = \sum_{k=0}^N kp_k \quad (3.7)$$

Para os valores utilizados anteriormente, o número médio de canais na região de sobreposição é de 4,507. Um gráfico bastante interessante é o que plota o número médio de canais na região de sobreposição em função do fator de sobreposição, para um certo tráfego na célula. Este gráfico, para os valores já utilizados, está apresentado na Figura 3.4.

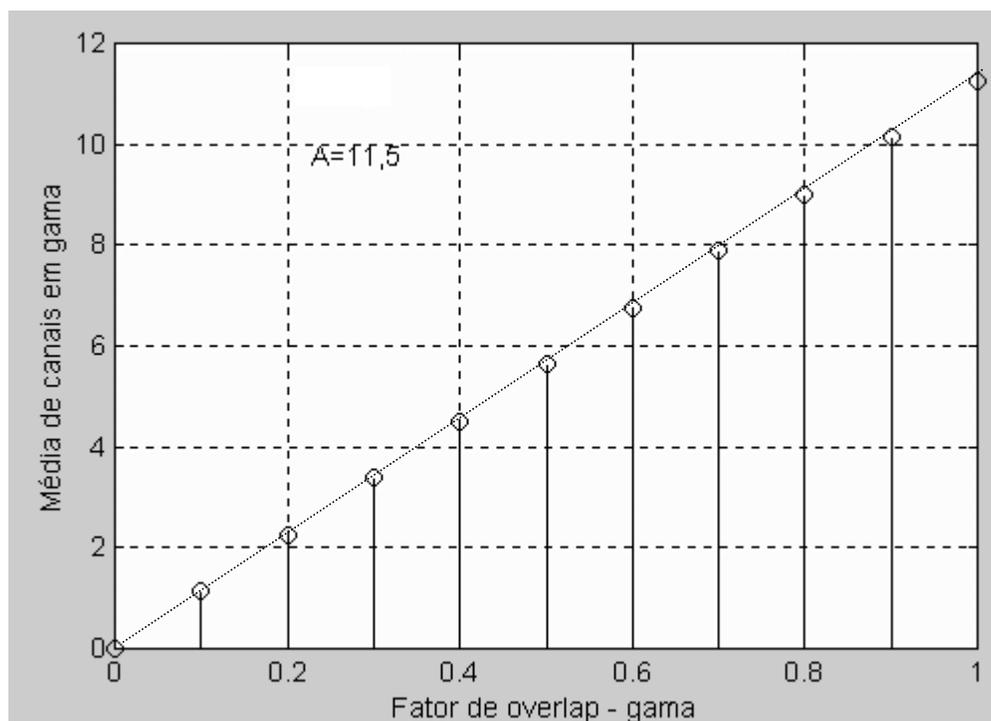


Figura 3.4 – Média de canais ocupados na região de sobreposição em função de  $\gamma$

Pode-se observar o comportamento linear da média de canais ocupados partindo da média de 0 canais ocupados para 0% de sobreposição e chegando a 11,2 canais ocupados para 100% de sobreposição. De fato, este comportamento motiva para que a Expressão (3.7) fosse melhor trabalhada. Manipulando convenientemente esta expressão, chega-se a:

$$E\{\text{canais ocupados em } \gamma\} = \gamma A(1 - B) \quad (3.8)$$

onde B é a probabilidade de bloqueio para o tráfego e o número de canais considerados.

Uma outra avaliação de (3.6) é o levantamento que está apresentado na Figura 3.5, onde  $p_k$  é obtido em função de  $\gamma$  para vários valores de  $k$ , cujo gráfico pôde ser obtido utilizando os seguintes dados:

- Tráfego oferecido  $A=11,5$  erlangs,
- Número de canais disponíveis na célula  $N=18$  e
- Canais ativos na região de sobreposição  $k=0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18$ .

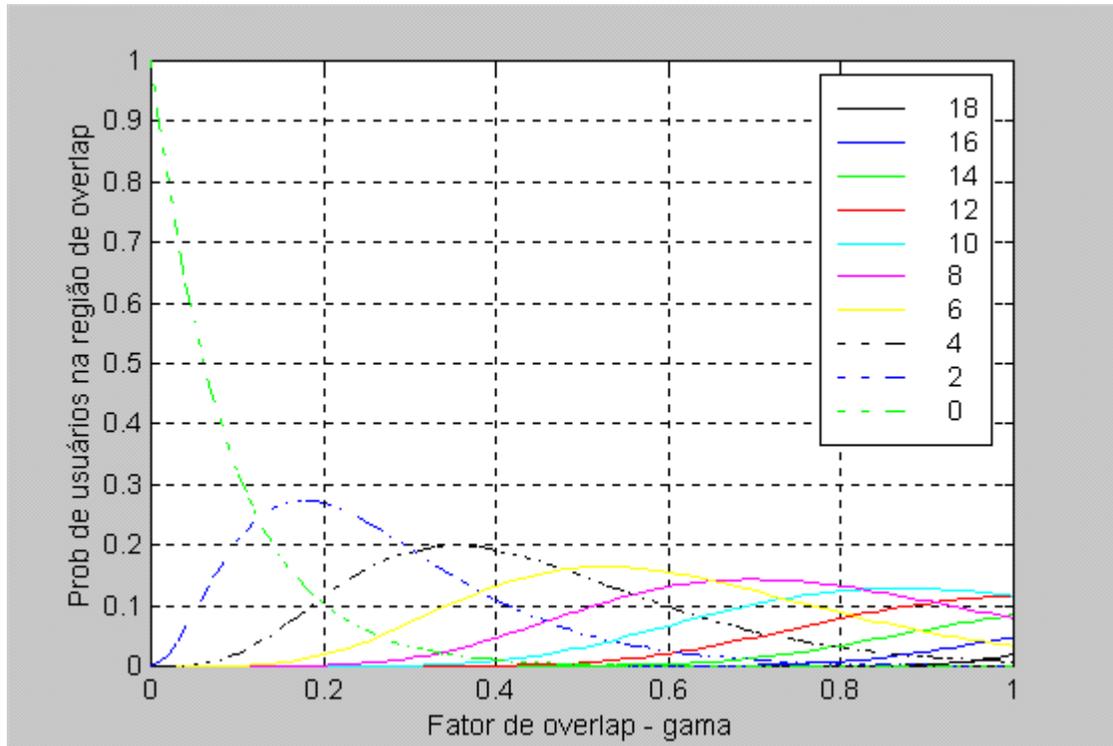


Figura 3.5 – Cálculo de  $p_k$  para tráfego poissoniano

Para  $\gamma = 0$  (0% de área de sobreposição) e  $k = 0$ , a curva parte de 1, o que é verdade para uma situação sem área de sobreposição, onde a probabilidade de nenhum canal ativo estar na área de sobreposição é de 100%. Para  $\gamma$  igual a 1 (100% de área de sobreposição) e  $k = 18$ , ou seja, probabilidade de 18 canais ativos na área de sobreposição, deve ser a própria probabilidade de bloqueio que, neste caso, para  $A=11,5$  e  $N=18$  é de 2%. Na curva para  $k = 18$  e  $\gamma = 1$ , realmente obtém-se 2% de bloqueio. Com estas observações fica evidenciada a coerência de (3.6) para o cálculo de  $k$  canais ativos na região de sobreposição  $\gamma$ .

### 3.2.2 Cálculo de $p_k$ para distribuição *Binomial*

Supondo que os canais tenham uma atividade  $p$  e todos os canais sejam equiprováveis, o que não é verdade para o caso da distribuição de *Erlang-B*, a probabilidade de existirem  $n$  canais ativos em  $N$  pode ser representada pela distribuição *Binomial*, dado por:

$$p_n = \binom{N}{n} p^n (1-p)^{N-n} \quad (3.9)$$

onde:  $p$  – representa o tráfego cursado por canal, representando a atividade dos canais,  
 $N$  – número total de canais na célula,  
 $n$  – número de canais e  
 $\gamma$  – proporção de área de sobreposição.

Com a hipótese de canais equiprováveis, esta atividade é calculada pela razão entre o tráfego escoado e o número de canais, dado por

$$p = \frac{\text{Trafego escoado}}{N} = \frac{A(1-B)}{N} \quad (3.10)$$

onde:  $A$  – tráfego oferecido e  
 $B$  – probabilidade de bloqueio.

Da mesma maneira como feito na seção 3.2.1, a probabilidade de canais ativos é substituída na Expressão (3.4). Neste caso  $p_k$  é calculada pela expressão:

$$p_k = \sum_{n=k}^N \binom{n}{k} \gamma^k (1-\gamma)^{n-k} \binom{N}{n} p^n (1-p)^{N-n} \quad (3.11)$$

A atividade de canais neste caso obedece a uma distribuição *Binomial*, e não mais à distribuição de *Erlang-B*, como na seção 3.2.1. A Figura 3.6 compara os resultados obtidos pelas Expressões (3.6) e (3.11).

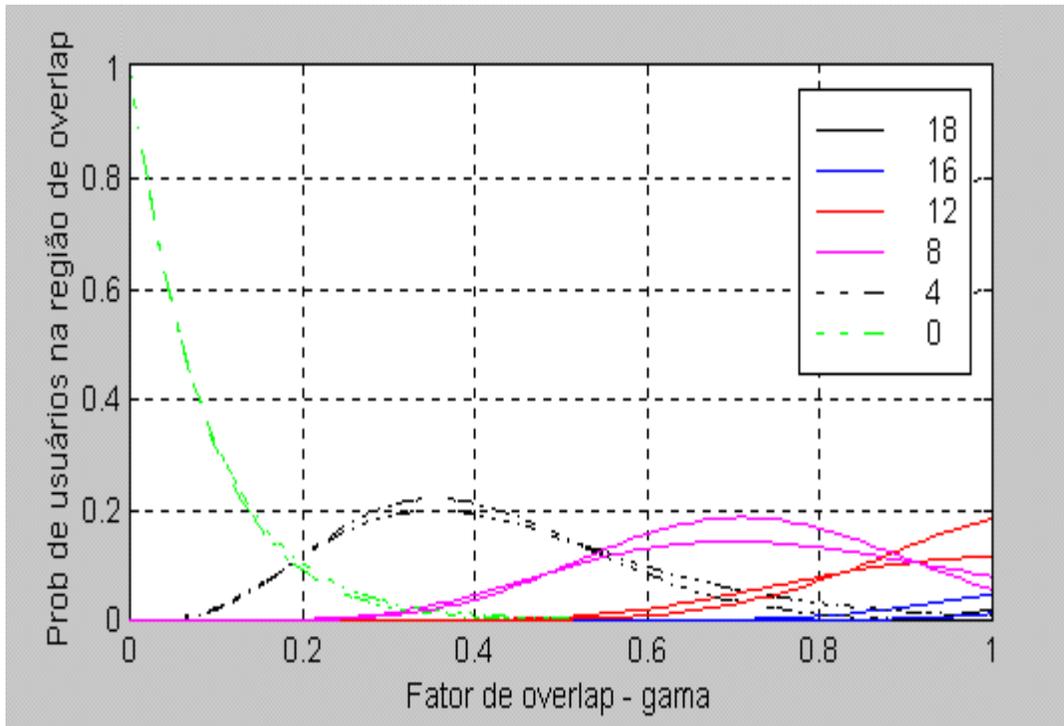


Figura 3.6 – Comparação dos resultados utilizando *Poisson* e *Bernoulli*

Pode-se observar a semelhança entre os resultados. Como já observado na Figura 3.5, para uma região de sobreposição de 0%, a probabilidade da inexistência de canais ativos nesta região deve ser 1, o que é possível de ser observado na Figura 3.6 para  $k=0$ . Já para o caso onde a região de sobreposição é de 100% e  $k=18$ , onde foi encontrado 2% de bloqueio na Figura 3.5, encontra-se um valor de 0,02%. Isto mostra que, para grandes valores de sobreposição, existe uma grande discrepância dos valores obtidos utilizando *Erlang-B* e *Binomial*. Porém, esta situação de grande sobreposição entre células é menos provável e mesmo indesejável em sistemas práticos.

Manipulando-se adequadamente (3.11), chega-se à expressão:

$$p_k = \binom{N}{k} (\gamma p)^k (1 - \gamma p)^{N-k} \quad (3.12)$$

Pode-se observar que (3.12) permite calcular a probabilidade  $p_k$  de forma mais rápida que (3.11), resultando em menor tempo computacional. Principalmente para 3 células, esta simplificação é importante devido a complexidade das expressões, como será mostrado no Capítulo 5.

### 3.3 Bloqueio de *soft handoff*

Antes de entrar propriamente na questão de interferência em sistemas CDMA, é interessante determinar a probabilidade de bloqueio devido ao tráfego de *soft handoff*, a qual servirá de subsídio na avaliação do desempenho das técnicas de planejamento, mostrando, assim, o comportamento deste bloqueio. No sistema com duas células, os usuários ativos na região de sobreposição podem estar em comunicação com as estações rádio base das duas células, e portanto em condição de *soft handoff*. A probabilidade de bloqueio de *soft handoff* é determinada considerando-se a chance de se estar em condição de *soft handoff* e de não se encontrarem canais disponíveis para a realização do *handoff*. O bloqueio sofrido é devido, portanto, ao tráfego de *soft handoff* não cursado. Para esta análise, considera-se um sistema simétrico com duas células iguais, tanto em área quanto em tráfego, como já mencionado anteriormente. Na análise que se segue, a célula 1 gerará o tráfego de *soft handoff*, sendo que parte dos canais ativos estará na região de sobreposição, com probabilidade  $p_k$ . A célula 2 será aquela que cursará este tráfego de *soft handoff* gerado pela célula 1, além do seu próprio tráfego. No bloqueio de *soft handoff* será gerado um tráfego de *soft handoff* pela célula 1 e este tráfego não será cursado pela célula 2. Nesta condição, a célula 2 estará carregada com seu tráfego interno ocupando todos os canais internos, ou com canais já alocados para *soft handoff*, devido ao tráfego da célula 1. Deve-se considerar todas as condições onde este evento ocorre para se obter o bloqueio de *soft handoff*. Para se gerar estas condições deve-se considerar o número de canais ativos na

região de sobreposição  $k$  devido à célula 1 e o número de canais ocupados  $n$  na célula 2. Deve-se considerar que cada uma das células possui um total de  $N_T$  canais disponíveis. As condições onde ocorre bloqueio de *soft handoff* estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1

Canais ativos na região de sobreposição	Canais ocupados na célula 2
$1 \leq k \leq N_T$	$n = N_T$
$2 \leq k \leq N_T$	$n = N_T - 1$
$3 \leq k \leq N_T$	$n = N_T - 2$
⋮	⋮
$k = N_T$	$n = 1$

A primeira coluna apresenta os canais ativos na região de sobreposição devido à célula 1. A coluna 2 apresenta o número de canais ativos na célula 2. Pode-se observar, na primeira linha, que os canais, na região de sobreposição, estão em bloqueio uma vez que a célula 2 está com seus  $N_T$  canais ocupados e, portanto, não pode cursar o tráfego de *soft handoff* gerado pela célula 1, ou seja, a condição de bloqueio é obtida para o número de canais na célula 1 variando de 1 a  $N_T$ . Nas outras linhas, esta condição de bloqueio se repete. Embora os canais na célula 2 não estejam todos ocupados, à exceção da primeira linha, os canais restantes da célula 2 estarão ocupados com tráfego de *soft handoff* ou interno da célula. Para todas as linhas da tabela, a célula 2 estará ocupando  $N_T$  canais, seja com tráfego interno ou *soft handoff*.

Da Tabela 3.1 conclui-se que a probabilidade de bloqueio de *soft handoff*  $P_{BHO}$  pode ser calculada como:

$$P_{BHO} = \sum_{l=1}^{N_T} \sum_{k=l}^{N_T} p_k p_{n=N_T-l+1} \quad (3.13)$$

onde:  $p_k$  – probabilidade de  $k$  canais ativos na região de sobreposição e  
 $p_n$  – probabilidade de  $n$  canais ativos na célula 2.

A probabilidade  $p_k$  de  $k$  canais ativos na região de sobreposição devido à célula 1 é aquela já apresentada pela Expressão (3.4). Substituindo (3.4) em (3.13) obtém-se a expressão para cálculo da probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, dada por:

$$p_{BHO} = \sum_{l=1}^{N_T} \sum_{k=l}^{N_T} \left( \sum_{n'=k}^{N_T} p_{n'}(k) p_{n'} \right) p_{n=N_T-l+1} \quad (3.14)$$

Em (3.14) a expressão entre colchetes representa a probabilidade de canais ativos na região de sobreposição devido à célula 1.

A probabilidade de bloqueio de *soft handoff* será utilizada para avaliação do planejamento, com a finalidade de verificar o desempenho de cada técnica. Porém, esta probabilidade pode ser utilizada independentemente, inclusive para avaliação de desempenho quanto ao bloqueio de *soft handoff* de qualquer tipo de planejamento. Para tanto,  $N_T$  deverá ser substituído pelo número de canais projetados para atender o tráfego da célula.

### **3.4 Probabilidade de outage**

Neste item, será abordada, do ponto de vista das probabilidades envolvidas, a questão da interferência em sistemas CDMA causada pelos usuários que operam ao mesmo tempo e ocupam a mesma faixa de frequência. No Capítulo 2, foi feita uma análise de interferência em sistemas CDMA, através da qual pôde se identificar uma situação onde a interferência pode ser desconsiderada, chegando-se a um número de  $N$  canais para atender ao tráfego da célula. Como já mostrado, no processo de *soft handoff*, o usuário utilizará dois canais, para o caso de duas células, o que leva à necessidade de uma estratégia para acomodar este tráfego extra. A opção adotada tradicionalmente é a de subtrair dos  $N$  canais projetados, aqueles destinados ao *soft handoff*, o que não implica em interferência, como já analisado no Capítulo 2. Uma outra possibilidade seria acrescentar canais aos  $N$  canais, chegando-se a  $N_T$  canais e, neste caso, existirá uma condição de interferência. Esta condição de

interferência com o aumento de canais na célula, além de  $N$ , pode ocorrer com uma certa probabilidade, dada a característica aleatória da originação de chamadas e posicionamento dos usuários na célula. Os fatores que alteram esta probabilidade podem ser: tráfego na célula, proporção de sobreposição entre as células, número de canais  $N_T$  ( $N$  mais os canais acrescidos), etc. Na técnica de planejamento proposta, faz-se uso justamente das probabilidades da atividade de canais nas células, o que pode implicar na degradação da qualidade, representada pela probabilidade de ocorrência.

É interessante, portanto, determinar, neste trabalho, a probabilidade destes eventos. Neste item será determinada a probabilidade de *outage*, a qual diz respeito à chance de o número de canais  $N$  serem excedidos. Sendo  $N_T$  o número total de canais, a diferença de  $N_T - N$  corresponde ao número de canais acrescentados aos  $N$  canais nominais que vai atender ao tráfego de *soft handoff*. Para se chegar à expressão do cálculo da probabilidade de *outage* são utilizadas duas abordagens. A primeira considera a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* e define a probabilidade de excesso, que seria o caso em que se admite a perda da ligação na ausência de canais livres na outra célula para cursar o tráfego de *soft handoff*. Na realidade esta seria a probabilidade de *outage* considerando-se a perda de ligação. A segunda abordagem considera diretamente a probabilidade do número de canais exceder o número de canais internos. Estas duas abordagens chegam ao mesmo resultado de probabilidade de *outage*. O objetivo de explorar estas duas abordagens é o de consolidar as considerações propostas.

#### 3.4.1 Cálculo da Probabilidade de *Outage* – primeira abordagem

Nesta abordagem o cálculo da probabilidade de *outage* é feita considerando-se duas parcelas. Uma é a probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, já calculada na seção 3.3, e a outra, a probabilidade de excesso que será definida neste item.

Para encontrar a expressão que calcula a probabilidade de excesso será feita análise onde se considera o número de canais ocupados da célula 2 acima dos  $N$  canais, ou seja, configurando o excesso de canais. Para se chegar a esta probabilidade, são exercitadas as condições onde ocorre o excesso. Abaixo seguem algumas das condições onde ocorre

excesso, com a análise dos canais ocupados na célula 1 e 2. Ao final de cada condição, chega-se à expressão para o cálculo da probabilidade da condição. A probabilidade de excesso será a soma destas probabilidades, como ficará evidenciado logo à frente. A seguir, exercitam-se algumas situações de ocupação de canais para se chegar à expressão final de probabilidade de excesso.

**a. Célula 2 com  $N_T$  canais ocupados**

Nesta condição são consideradas as situações onde a célula 2 terá  $N_T$  canais ocupados, seja para tráfego interno da célula, seja para tráfego de *soft handoff* gerado pela célula 1. É importante observar que nesta condição existirá um “Bloqueio da Célula”, ou seja, a célula 2 sempre terá seus  $N_T$  canais ocupados. Este bloqueio da célula 2 pode ser definido como a probabilidade de bloqueio de célula, onde não existe a possibilidade de espera para chamadas não atendidas (*Blocked Hand Off Calls Cleared*). Isto significa que, se for requisitado handoff para um móvel e não houver canal disponível para atendimento, a chamada será derrubada por baixa intensidade de sinal e por falta de canal para soft-handoff. Esta não é a condição usual encontrada nos sistemas, uma vez que o móvel continua conectado a uma estação base, mesmo que não se consiga um canal para fazer handoff. A Tabela 3.2 mostra esta condição.

Tabela 3.2

Canais Ativos na região de sobreposição devido à Célula 1	Canais ocupados na Célula 2
$n = 0$	$k = N_T$
$n = 1$	$k = N_T - 1$
$n = 2$	$k = N_T - 2$
⋮	⋮
$n = N$	$k = N_T - N$
$n = N + 1$	$k = N_T - N - 1$
⋮	⋮
$n = N_T$	$k = 0$

Pode-se observar que, para o cálculo desta probabilidade, será necessária a variação do número de canais na célula 2 de  $N_T$  a 0 e, na região de sobreposição, de 0 a  $N_T$ , ou seja,

na soma sempre estarão ocupados  $N_T$  canais na célula 2. Analisando a tabela, a probabilidade de  $N_T$  canais ativos na célula 2 é determinada pela seguinte expressão:

$$P_{N_T} = \sum_{k=0}^{N_T} P_k P_{n=N_T-k} \quad (3.15)$$

Podemos interpretar esta expressão como a probabilidade de bloqueio da célula, equivalente à probabilidade de bloqueio obtida na tabela de *Erlang-B*. Pode-se verificar que, nesta condição, todos os canais estão tomados, seja para cursar tráfego de *soft handoff*, seja para cursar o tráfego interno da célula.

**b. Célula 2 com  $N_T - 1$  canais ocupados**

São consideradas as condições onde a célula 2 terá  $N_T - 1$  canais ocupados, seja para tráfego interno da célula, seja para tráfego de *soft handoff*. A Tabela 3.3 apresenta esta condição.

Tabela 3.3

Canais Ativos na região de sobreposição devido à Célula 1	Canais ocupados na Célula 2
$k = 0$	$n = N_T - 1$
$k = 1$	$n = N_T - 2$
$k = 2$	$n = N_T - 3$
⋮	⋮
$k = N$	$n = N_T - N - 1$
$k = N + 1$	$n = N_T - N - 2$
⋮	⋮
$k = N_T - 1$	$n = 0$

Salienta-se que, neste caso, existirão  $N_T - 1$  canais ativos na célula 2. Analisando a tabela, a probabilidade deste evento será:

$$P_{N_T-1} = \sum_{k=0}^{N_T-1} P_k P_{n=(N_T-1)-k} \quad (3.16)$$

**c. Célula 2 com  $N_T - 2$  canais ocupados**

São consideradas as condições onde a célula 2 terá  $N_T - 2$  canais ocupados, seja para tráfego interno da célula seja para tráfego de *soft handoff*. A Tabela 3.4 apresenta esta condição.

Tabela 3.4

Canais Ativos na região de sobreposição devido à Célula 1	Canais ocupados na Célula 2
$k = 0$	$n = N_T - 2$
$k = 1$	$n = N_T - 3$
$k = 2$	$n = N_T - 4$
⋮	⋮
$k = N$	$n = N_T - N - 2$
$k = N + 1$	$n = N_T - N - 3$
⋮	⋮
$k = N_T - 2$	$n = 0$

É importante verificar que neste caso existirão  $N_T - 2$  canais ativos na célula 2. Analisando a Tabela 3.4, a probabilidade deste evento será:

$$P_{N_T-2} = \sum_{k=0}^{N_T-2} P_k P_{m=(N_T-2)-k} \quad (3.17)$$

**d. Célula 2 com  $N + 1$  canais ocupadas**

São consideradas as condições onde a célula 2 terá  $N + 1$  canais ocupados, seja para tráfego interno da célula, seja para tráfego de *soft handoff*. Esta é a condição limite onde a célula 2 terá  $N + 1$ , que é a última condição de excesso. A Tabela 3.5 apresenta esta condição.

Tabela 3.5

Canais Ativos na região de sobreposição devido à Célula 1	Canais ocupados na Célula 2
$k = 0$	$n = N + 1$
$k = 1$	$n = N$
$k = 2$	$n = N - 1$
⋮	⋮
$k = N$	$n = 1$
$k = N + 1$	$n = 0$

Observa-se que neste caso existirão  $N+1$  canais ativos na célula 2. Analisando a Tabela 3.5, a probabilidade deste evento será:

$$p_{N+1} = \sum_{k=0}^{N+1} p_k p_{n=(N+1)-k} \quad (3.18)$$

A Tabela 3.6 apresenta uma síntese das Tabelas 3.2 a 3.5, para as regiões de sobreposição e célula 2. A probabilidade de excesso será obtida considerando-se a soma das probabilidade das condições apresentadas em cada linha da Tabela 3.6.

Tabela 3.6

Condições	Canais ativos na região de sobreposição	Canais ocupados na Célula 2	Canais disponíveis na Célula 2
a	$k = 0 \rightarrow N_T$	$n = N_T \rightarrow 0$	$N_T$
b	$k = 0 \rightarrow N_T - 1$	$n = N_T - 1 \rightarrow 0$	$N_T - 1$
c	$k = 0 \rightarrow N_T - 2$	$n = N_T - 2 \rightarrow 0$	$N_T - 2$
⋮	⋮	⋮	⋮
d	$k = 0 \rightarrow N + 1$	$n = N + 1 \rightarrow 0$	$N + 1$

Estas são as condições nas quais a célula 2 estará com canais ocupados de  $N + 1$  a  $N_T$  canais, seja para tráfego interno ou de *soft handoff*. Isto implica em se ter aumento de interferência. Considerando as condições da Tabela 3.6, a probabilidade de excesso é calculada pela seguinte expressão:

$$P_{exc} = \sum_{q=N+1}^{N_T} \sum_{k=0}^q P_k P_{n=q-k} \quad (3.19)$$

Para se chegar à probabilidade de *outage*, deve-se somar a probabilidade de excesso, dada por (3.19), com a probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, dada por (3.13). Assim, a probabilidade de *outage* cobre todas as condições onde existe interferência, ou seja, a situação onde existem mais canais ativos que aqueles onde a interferência pode ser desconsiderada. A probabilidade de *outage*, portanto, é calculada pela seguinte expressão:

$$P_{out} = P_{exc} + P_{BHO} = \sum_{q=N+1}^{N_T} \sum_{k=0}^q P_k P_{m=q-k} + \sum_{l=1}^{N_T} \sum_{k=1}^{N_T} P_k P_{m=N_T-l+1} \quad (3.20)$$

### 3.4.2 Probabilidade de *Outage* – segunda abordagem

Trata-se de uma outra forma de calcular a probabilidade de *outage*. Tomando a célula 2 como referência, deve-se calcular a probabilidade de o número de canais na célula 2 exceder  $N$  canais. Porém, neste será calculada a probabilidade de serem excedidos os canais  $N+1$  a  $N_T - 1$ , mais a probabilidade de  $N$  canais ocupados na célula 2. Neste último caso, pode-se considerar qualquer número de canais na região de sobreposição. Pode-se verificar que a chamada não atendida é mantida no sistema, não sendo derrubada. Para as probabilidades envolvidas é feita, a seguir, análise das condições consideradas.

#### a. Célula 2 com $N_T$ canais ocupados

A Tabela 3.7 abaixo mostra esta condição.

Tabela 3.7

Canais ativos na região de sobreposição	Canais ativos na Célula 2
$0 \leq k \leq N_T$	$n = N_T$
$1 \leq k \leq N_T$	$n = N_T - 1$
$2 \leq k \leq N_T$	$n = N_T - 2$
⋮	⋮
$k = N_T$	$n = 0$

Analisando a tabela, chega-se à expressão desta probabilidade, dada por:

$$prob = \sum_{l=0}^{N_T} \sum_{k=l}^{N_T} p_k p_{n=N_T-l} \quad (3.21)$$

### b. Célula 2 com $N_T - 1$ canais ocupados

A Tabela 3.8 abaixo mostra esta condição:

Tabela 3.8

Canais ativos na região de sobreposição	Canais ativos na Célula 2
$k = 0$	$n = N_T - 1$
$k = 1$	$n = N_T - 2$
⋮	⋮
$k = N_T - 1$	$n = 0$

Analisando a tabela, chega-se à expressão desta probabilidade, dada por:

$$prob = \sum_{k=0}^{N_T-1} p_k p_{n=(N_T-1)-k} \quad (3.22)$$

### c. Célula com $N_T - 2$ canais ocupados

A Tabela 3.9 abaixo mostra esta condição:

Tabela 3.9

Canais ativos na região de sobreposição	Canais ativos na Célula 2
$k = 0$	$n = N_T - 2$
$k = 1$	$n = N_T - 3$
⋮	⋮
$k = N_T - 2$	$n = 0$

Analisando a tabela, chega-se à expressão desta probabilidade, dada por:

$$prob = \sum_{k=0}^{N_T-2} p_k p_{n=(N_T-2)-k} \quad (3.23)$$

#### d. Célula 2 com $N+1$ canais ocupados

A Tabela 3.10 abaixo mostra esta condição:

Tabela 3.10

Canais ativos na região de sobreposição	Canais ativos na Célula 2
$k = 0$	$n = N + 1$
$k = 1$	$n = N$
⋮	⋮
$k = N + 1$	$n = 0$

Analisando a tabela, chega-se à expressão desta probabilidade, dada por:

$$prob = \sum_{k=0}^{N+1} p_k p_{n=(N+1)-k} \quad (3.24)$$

A probabilidade de *outage* é a soma de todas estas probabilidades, isto é:

$$p_{out} = \sum_{l=0}^{N_T} \sum_{k=l}^{N_T} p_k p_{n=N-l} + \sum_{q=N+1}^{N_T-1} \sum_{k=0}^q p_k p_{n=q-k} \quad (3.25)$$

As expressões (3.20) e (3.25) são equivalentes.

### 3.5 Conclusão

Neste capítulo foram desenvolvidos os conceitos e expressões, para duas células, que formam a base para o desenvolvimento da técnica de planejamento proposto por este trabalho. Embora o arranjo de duas células não seja prático, a formulação das expressões para este caso é menos complexa e permite, mais facilmente, a avaliação dos resultados. A determinação da probabilidade de canais ativos na região de sobreposição é um resultado importante, pois é a base para a determinação das probabilidades de bloqueio de *soft handoff* e *outage*. Outro ponto a se destacar é a verificação da viabilidade em se utilizar a distribuição *Binomial*, alternativamente à distribuição de *Erlang-B*, para representar o comportamento de tráfego nas células que geram o tráfego de *soft handoff*. A utilização de *Binomial* possibilita menor tempo computacional nos cálculos. Esta redução de tempo de cálculo é expressiva, justificando plenamente sua utilização, principalmente para regiões de sobreposição inferiores a 50%, onde os resultados utilizando *Erlang-B* e *Binomial* se aproximam bastante.

Foram desenvolvidos os conceitos e expressões para determinação das probabilidades de *soft handoff* e *outage*, as quais formam a base para a técnica de planejamento proposta por este trabalho. O cálculo destas probabilidades acrescenta novos parâmetros de análise no dimensionamento do sistema. Os valores adequados para estas probabilidades dependem dos critérios de qualidade propostos no planejamento. No Capítulo 5 serão obtidas as curvas para três sistemáticas de planejamento, utilizando os resultados para duas células, obtidos aqui.

Com os resultados consolidados neste capítulo, para o caso de duas células, no próximo capítulo serão estendidos estes resultados para o caso de três células. É importante notar que a utilização de arranjo de duas células tem papel importante, por ser de menor complexidade, para consolidação dos conceitos, permitindo, assim, a evolução para o arranjo de três células.



## 4 Considerações Sobre Três Células

### 4.1 Introdução

Neste capítulo desenvolve-se um modelo teórico, aplicável a três células, para o cálculo da probabilidade de bloqueio de *soft handoff* e probabilidade de *outage*. Como no Capítulo 3, fez-se uma análise para duas células; o objetivo aqui é determinar as probabilidades envolvidas na operação de *soft handoff* em sistema celulares CDMA, tratando todos os conceitos e expressões para o cálculo de probabilidades para o caso de três células. Será feita uma generalização do método desenvolvido para duas células para atender às necessidades do caso de três células. O arranjo de três células é uma estrutura básica mais prática do ponto de vista de aplicação nos sistemas comerciais, uma vez que o padrão IS-95 prevê a condição de o móvel poder estar conectado a até três bases e, neste caso, ocupando mais recursos do sistema para tráfego de informação.

Antes de entrar propriamente no cálculo das probabilidades dos eventos, é necessário determinar a distribuição de canais ativos nas regiões de sobreposição. Para o caso de três células, além da sobreposição entre duas células, existe também a sobreposição entre três células, podendo o móvel, neste caso, estar conectado a três estações base. Portanto, além do cálculo da probabilidade de canais ativos entre duas células, é necessário levar-se em consideração, também, a condição de existirem canais ativos na região entre três células. Esta discriminação entre regiões de sobreposição é necessária pois permite utilizar proporções independentes. Para este caso é utilizada a generalização da distribuição *Trinomial*, com a qual se avalia a atividade de canal nas regiões de sobreposição entre duas e três células. Como uma possibilidade de generalização, esta metodologia pode ser aplicada para qualquer número de células. A determinação da probabilidade de canais ativos nas regiões de sobreposição é a base para o cálculo das probabilidades no caso de três células.

Para se modelar o comportamento do tráfego nas células, será inicialmente utilizada a distribuição de *Erlang-B*. Para o comportamento do tráfego nas células que irão contribuir

para o tráfego de *soft handoff*, alternativamente, e por simplificação, será utilizada a distribuição *Binomial*, a exemplo do que foi feito para duas células. A utilização de *Binomial* propicia menor tempo de processamento computacional, que é de grande importância principalmente para arranjos com três células, onde as expressões são complexas. As duas distribuições, *Erlang-B* e *Binomial*, serão comparadas, com o intuito de se mostrar que é possível a utilização da distribuição *Binomial*. Esta aproximação é mais expressiva, principalmente para valores de sobreposição no entorno de 50%, que é a condição mais encontrada em sistemas celulares implantados. A aproximação ainda é muito boa para valores superiores de sobreposição.

Este capítulo se inicia com a análise das regiões de sobreposição para três células. A seção subsequente a esta trata da distribuição de canais ativos nas regiões de sobreposição chegando-se às expressões para o cálculo destas probabilidades. Ao final desta seção é feita uma comparação entre as distribuições de *Erlang-B* e *Binomial* na determinação da atividade de canais nas regiões de sobreposição. A seguir, é calculada a probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, onde são exploradas as condições em que se tem este bloqueio. A probabilidade de bloqueio de *soft handoff* indica a chance de um usuário não conseguir entrar em *soft handoff* por falta de canais destinados para este fim. Na próxima seção obtém-se a probabilidade de *outage*. Como já mostrado no Capítulo 3, a probabilidade de *outage* significa a chance de o número de canais ativos na região de sobreposição ultrapassar um certo limite de canais, acima do qual a interferência ultrapassa aquela especificada pelo sistema. Estas duas probabilidades formam a base para o método de planejamento proposto.

## **4.2 Análise das Regiões de Sobreposição**

Como já mencionado no Capítulo 3, em um sistema celular os limites de fronteiras entre células não são rígidos, existindo regiões de sobreposição. Como diferença para o caso de duas células, com três células existe a região de sobreposição entre três células, além daquelas de duas células. A dimensão desta sobreposição é determinante no planejamento de sistemas CDMA, pois ela tem uma implicação direta no dimensionamento de canais

para atendimento do tráfego da célula e de *soft handoff*. Quanto maior as regiões de sobreposição maior será a probabilidade de existirem canais ativos nestas regiões e, portanto, ocupando recursos de duas ou mesmo três estações base. Deve-se, assim, determinar a probabilidade de canais ativos nas região de sobreposição, uma vez que desta probabilidade dependerá todo o planejamento proposto. A Figura 4.1 apresenta novamente a Figura 2.2, que identifica as regiões de sobreposição para três células. Utilizam-se os fatores  $\gamma$  e  $\delta$  para representar as proporções de sobreposição.

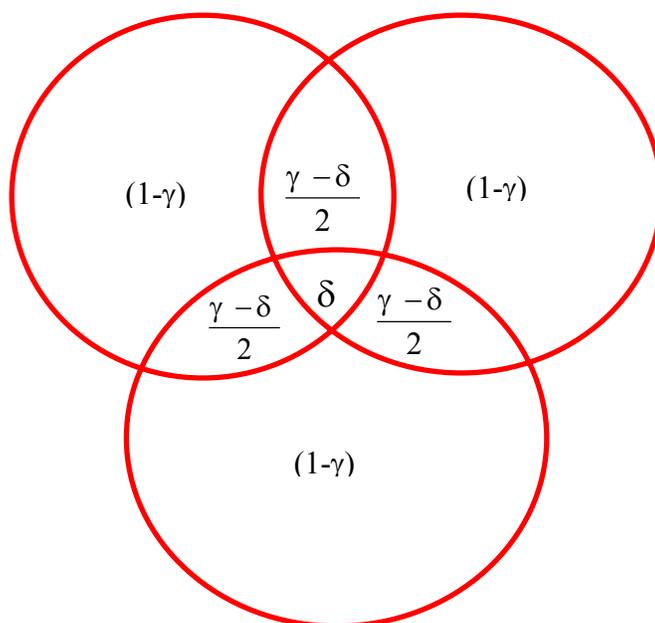


Figura 4.1 – Proporção de área para três células

São identificadas como regiões de sobreposição aquelas onde o móvel terá acesso a duas células e aquelas onde o móvel terá acesso a três células. Dada a simetria do problema, define-se uma das células como a célula alvo, sobre a qual serão feitas todas as análises de sobreposição e atividade de canais. Pela figura, encontram-se três regiões de sobreposição distintas, se analisadas do ponto de vista da célula alvo, para efeito de cursar o tráfego de *soft handoff* proveniente das duas células vizinhas. Na Figura 4.1, estão apresentadas as proporções de área da célula dividida entre regiões sem sobreposição e regiões com sobreposição entre duas e três células.

A região de acesso a três células é proporcional à  $\delta$ . Esta região pode ser aproximada por  $\gamma$ , como se mostra na expressão (2.14), repetida abaixo:

$$\delta = k\gamma^2, \quad k > 0 \quad (4.1)$$

Uma boa aproximação é obtida em [9], para  $k=1$ , resultando, portanto, na seguinte expressão:

$$\delta \cong \gamma^2 \quad (4.2)$$

Esta aproximação permite utilizar somente a proporção  $\gamma$ , que representa a proporção de área de sobreposição de duas ou mais células, como variável de proporção de área para o cálculo das probabilidades. Em situações reais, esta aproximação pode facilmente ser levada em consideração, sem comprometer a análise realizada neste trabalho.

### **4.3 Distribuição de Canais Ativos nas Regiões de Sobreposição**

Nesta seção faz-se a análise da atividade de canais nas regiões de sobreposição com duas e três células. No final dela serão obtidas as expressões para cálculo das probabilidades de atividade de canal nas regiões de sobreposição. Serão deduzidas duas expressões, uma utilizando a distribuição de *Erlang-B* e outra a de *Binomial*, a exemplo do que foi feito no Capítulo 3 para o caso de duas células.

Na análise de canais ativos nas regiões de sobreposição, elege-se uma célula dentre as três, a célula alvo considerada aqui como sendo a célula 3, que deverá cursar o tráfego de *soft handoff* gerado pelas outras duas células, no caso células 1 e 2, devido às regiões de sobreposição. Sendo assim, todas as considerações aqui feitas dizem respeito às células 1 e 2 que irão gerar o tráfego de *soft handoff*, que deverá ser levado em consideração no planejamento da célula 3 [16,17].

Dada uma certa proporção de sobreposição, determina-se a probabilidade de canais ativos nestas regiões, os quais, nas regiões de sobreposição, estarão em situação de *soft handoff* com a outra célula, neste caso, a célula 3. Sendo assim, a célula 3 deverá ter seu dimensionamento dependente desta probabilidade de canais ativos que, por sua vez, é dependente da proporção das regiões de sobreposição. É importante notar, entretanto, que existe uma simetria, ou seja, a solução encontrada para uma célula será a mesma para as outras células.

Para determinar as probabilidades envolvidas no caso de três células, utiliza-se a distribuição *Trinomial* [18,19]. Deve-se determinar a probabilidade de canais ativos nas regiões de sobreposição devido à célula vizinha. Sendo assim,  $p_{k_1, k_2 | n}$  representa a probabilidade de existirem  $k_1$  canais ativos na região de sobreposição entre duas células e  $k_2$  canais ativos na região de sobreposição entre três células, para  $n$  canais ativos na célula vizinha. Ou seja:

$$p_{k_1, k_2 | n} = \text{Prob} \{k_1 \text{ canais ativos na sobreposição entre duas células e } k_2 \text{ canais ativos na sobreposição entre três células}\} \quad (4.3)$$

Para chegar-se à expressão da probabilidade  $p_{k_1, k_2 | n}$ , utiliza-se a generalização de *Bernoulli*, na qual tem-se um conjunto de  $r$  eventos, onde cada evento ocorre  $\{k_1, k_2, \dots, k_r\}$  vezes com suas respectivas probabilidades  $p_1, p_2, \dots, p_r$ . Traduzindo isto para o caso em questão, seja uma célula com  $r-1$  regiões de sobreposição e uma região sem sobreposição, isso totaliza  $r$  regiões. Dado que existem  $n$  canais ativos, a questão é determinar a probabilidade de existirem  $k_1$  canais ativos na região 1,  $k_2$  canais ativos na região 2, ..... e  $k_r$  canais ativos na região  $r$ . Logicamente, deve-se ter a soma das probabilidades dos eventos igual à unidade, ou seja:

$$p_1 + p_2 + \dots + p_r = 1 \quad (4.4)$$

A soma de todos os canais ativos nas  $r$  regiões deve ser igual à  $n$ , ou seja:

$$k_1 + k_2 + \dots + k_r = n \quad (4.5)$$

Assim chega-se na distribuição *Multinomial*, que é dada por:

$$P_{k_1, k_2, \dots, k_r | n} = \frac{n!}{k_1! k_2! \dots k_r!} p_1^{k_1} p_2^{k_2} \dots p_r^{k_r} \quad (4.6)$$

A Expressão (4.6) deve ser adequada ao caso de três células, onde devem ser avaliadas as condições de canais ocupados em regiões de sobreposição de duas células e regiões de sobreposição de três células. Para o caso de três células desta generalização chega-se na distribuição *Trinomial*, que será utilizada considerando somente  $k_1$  e  $k_2$ . Isto se deve ao fato de existirem somente duas regiões de sobreposição distintas, para uma célula vizinha. Com estas considerações a expressão para o cálculo das probabilidades de  $k_1$  e  $k_2$  canais ativos nas regiões de sobreposição é dada por:

$$P_{k_1, k_2 | n} = \frac{n!}{k_1! k_2! (n - k_1 - k_2)!} p_1^{k_1} p_2^{k_2} (1 - p_1 - p_2)^{n - k_1 - k_2} \quad (4.7)$$

onde:  $k_1$  – número de canais ativos na região de sobreposição com proporção de área  $p_1$  entre a célula 1 ou 2 com a célula 3 e

$k_2$  – número de canais ativos na região de sobreposição com proporção de área  $p_2$  entre as células 1, 2 e 3.

Pode-se observar, pelas considerações acima, a possibilidade da utilização desta distribuição para uma célula com várias regiões de sobreposição. Esta generalização é a base para estender os resultados obtidos para qualquer número de regiões de sobreposição e, portanto, para qualquer número de células. Nas próximas seções, será utilizada a probabilidade (4.7), sendo importante recordar que no caso de três células é necessário encontrar a probabilidade de ocorrerem os eventos  $k_1$  e  $k_2$ .

As probabilidades em questão são obtidas utilizando as proporções de áreas de sobreposição, como se vê na Figura 4.1, a saber:

$$p_1 = \frac{\gamma - \delta}{2} \quad (4.8)$$

$$p_2 = \delta \quad (4.9)$$

Substituindo (4.8) e (4.9) em (4.7), chega-se à probabilidade  $p_{k_1, k_2 | n}$ , ou seja:

$$p_{k_1, k_2 | n} = \frac{n!}{k_1! k_2! (n - k_1 - k_2)!} \left( \frac{\gamma - \delta}{2} \right)^{k_1} \delta^{k_2} \left( 1 - \frac{\gamma - \delta}{2} - \delta \right)^{n - k_1 - k_2} \quad (4.10)$$

Trabalhando-se esta expressão, chega-se à seguinte expressão:

$$p_{k_1, k_2 | n} = \frac{n!}{k_1! k_2! (n - k_1 - k_2)!} \left( \frac{\gamma - \delta}{2} \right)^{k_1} \delta^{k_2} \left( \frac{2 - \gamma - \delta}{2} \right)^{n - k_1 - k_2} \quad (4.11)$$

Substituindo (4.2) em (4.11), obtém-se a expressão condicional da probabilidade de canais ativos nas regiões de sobreposição, dada por:

$$p_{k_1, k_2 | n} = \frac{n!}{k_1! k_2! (n - k_1 - k_2)!} \left( \frac{\gamma - \gamma^2}{2} \right)^{k_1} \gamma^{2k_2} \left( \frac{2 - \gamma - \gamma^2}{2} \right)^{n - k_1 - k_2} \quad (4.12)$$

A Expressão (4.12) estima a probabilidade de canais ativos nas regiões de sobreposição de duas e três células dados  $n$  canais ativos. Esta probabilidade está condicionada à probabilidade  $p_n$  de existirem  $n$  canais ativos na célula. Portanto, para determinar a probabilidade  $p_{k_1, k_2}$  de canais ativos nas regiões de sobreposição, deve-se

descondicionar esta probabilidade utilizando-se o teorema da probabilidade total, onde se considera  $p_n$ . Assim, o objetivo é determinar:

$$p_{k_1, k_2} = \text{Prob}\{k_1 \text{ canais ativos na região de sobreposição de duas células e } k_2 \text{ canais ativos na região de sobreposição de três células}\} \quad (4.13)$$

Utilizando-se o teorema da probabilidade total [18,19], chega-se à seguinte expressão:

$$p_{k_1, k_2} = \sum_{n=k_1+k_2}^N p_{k_1, k_2|n} p_n \quad (4.14)$$

Observar na Expressão (4.14), que os limites da somatória devem variar de  $k_1+k_2$  a  $N$ , onde  $N$  é o número de canais alocados na célula.

A probabilidade  $p_n$  representa a atividade dos canais na célula que irá gerar o tráfego de *soft handoff*. A probabilidade  $p_n$ , tradicionalmente, é representada pela distribuição de *Erlang-B*. Alternativamente, pode ser utilizada a distribuição *Binomial*, que irá simplificar as expressões e melhorar o desempenho computacional em termos de tempo de cálculo. A seguir, para cada uma destas possibilidades de representação do tráfego, é avaliada a expressão da probabilidade de canais ativos nas regiões de sobreposição.

#### 4.3.1 Cálculo de $p_{k_1, k_2}$ para a distribuição de *Erlang-B*

A utilização da distribuição de *Erlang-B* é a forma, tradicionalmente, empregada para caracterizar o comportamento de chamadas segundo chegadas com distribuição poissoniana e duração dada por uma exponencial negativa [14]. Neste caso, a expressão é dada por:

$$p_n = \frac{A^n / n!}{\sum_{i=0}^N A^i / i!} \quad (4.15)$$

onde:  $A$  – tráfego oferecido e

$N$  – número de canais alocados à célula.

Substituindo-se em (4.14) as expressões (4.12) e (4.15), obtém-se a probabilidade de canais ativos nas regiões de sobreposição, obtendo-se a seguinte expressão:

$$p_{k_1, k_2} = \sum_{n=k_1+k_2}^N \frac{n!}{k_1! k_2! (n-k_1-k_2)!} \left( \frac{\gamma - \gamma^2}{2} \right)^{k_1} \gamma^{2k_2} \left( \frac{2 - \gamma - \gamma^2}{2} \right)^{n-k_1-k_2} \frac{A^n / n!}{\sum_{i=0}^N A^i / i!} \quad (4.16)$$

Esta expressão é complexa e tem alto custo computacional. É desejável encontrar uma expressão que otimize o tempo computacional. A exemplo do que foi feito para o caso de duas células, a próxima seção apresenta uma alternativa utilizando a distribuição *Binomial* para descrever o comportamento de tráfego das células geradoras de tráfego de *soft handoff*. Também, é apresentada uma comparação entre as duas distribuições utilizadas para o cálculo da probabilidade de atividade de canal nas regiões de sobreposição.

#### 4.3.2 Cálculo de $p_{k_1, k_2}$ para a distribuição *Binomial*

Neste caso o comportamento das chamadas nas células geradoras de tráfego de *soft handoff* atende à distribuição *Binomial*. Este comportamento já foi utilizado no Capítulo 3 pela Expressão (3.9), ou seja:

$$p_n = \binom{N}{n} p^n (1-p)^{N-n} \quad (4.17)$$

Da mesma forma como foi considerado para o caso de duas células, utiliza-se também a Expressão (3.10), repetida abaixo, para representar a probabilidade de atividade na célula, ou seja:

$$p = \frac{\text{Trafego escoado}}{N} = \frac{A(1-B)}{N} \quad (4.18)$$

onde:  $A$  – tráfego oferecido e

$B$  – probabilidade de bloqueio.

Considerando o tráfego uniformemente distribuído, a probabilidade de canal ativo se encontrar na região com acesso a duas células é:

$$\text{Prob de canal ativo na sobreposição entre duas células} = \frac{A(1-B)}{N} \frac{\gamma - \delta}{2} \quad (4.19)$$

Da mesma forma, para o caso de acesso a três células, a probabilidade de um canal ativo se encontrar nesta região será:

$$\text{Prob de canal ativo na sobreposição entre três células} = \frac{A(1-B)}{N} \delta \quad (4.20)$$

Assim, utilizando-se a distribuição *Trinomial*, expressa por (4.7), e considerando  $p_n$  descrito por (4.17), a exemplo do que foi feito para o caso de duas células para obtenção de (3.13), a distribuição  $p_{k_1, k_2}$  para o caso de três células é:

$$p_{k_1, k_2} = \frac{n!}{k_1! k_2! (n - k_1 - k_2)!} \left[ \frac{\gamma - \delta}{2} \frac{A(1-B)}{N} \right]^{k_1} \left[ \delta \frac{A(1-B)}{N} \right]^{k_2} \times \left[ 1 - \frac{\gamma - \delta}{2} \frac{A(1-B)}{N} - \delta \frac{A(1-B)}{N} \right]^{n - k_1 - k_2} \quad (4.21)$$

Trabalhando esta expressão, chega-se à expressão da probabilidade de canais ativos nas regiões de sobreposição, considerando *Binomial* para descrever o comportamento do tráfego nas células vizinhas à célula alvo, ou seja:

$$p_{k_1, k_2} = \frac{n!}{k_1! k_2! (n - k_1 - k_2)!} \left[ \frac{\gamma - \delta}{2} \frac{A(1-B)}{N} \right]^{k_1} \left[ \delta \frac{A(1-B)}{N} \right]^{k_2} \times \left[ 1 - \frac{A}{2N} (1-B)(\gamma + \delta) \right]^{n - k_1 - k_2} \quad (4.22)$$

Utilizando-se a aproximação estabelecida na Expressão (4.2), chega-se à probabilidade desejada, ou seja:

$$p_{k_1, k_2} = \frac{n!}{k_1! k_2! (n - k_1 - k_2)!} \left[ \frac{\gamma - \gamma^2}{2} \frac{A(1-B)}{N} \right]^{k_1} \left[ \gamma^2 \frac{A(1-B)}{N} \right]^{k_2} \times \left[ 1 - \frac{A}{2N} (1-B)(\gamma + \gamma^2) \right]^{n - k_1 - k_2} \quad (4.23)$$

É importante ressaltar que, para o cálculo desta probabilidade, considera-se somente  $\gamma$ , que é a proporção de área de sobreposição entre duas ou mais células. O objetivo disto é a utilização de somente uma variável para representar a proporção de área de sobreposição. No caso em que for necessário considerar como variável independente a proporção de área de sobreposição entre três células, utiliza-se a Expressão (4.22).

A utilização da *Binomial* tem por objetivo minimizar o tempo de cálculo das probabilidades. Esta vantagem pode ser observada ao se comparar a Expressão (4.16), que utiliza *Erlang-B*, com a Expressão (4.23), que utiliza *Binomial*. Observar-se que no primeiro caso utiliza-se uma somatória, o que, no segundo caso, não foi necessário. Em função da complexidade das expressões a serem calculadas, este fato é bastante relevante.

A Figura 4.2 apresenta as curvas obtidas para cálculo de  $p_{k_1, k_2}$ , utilizando-se (4.16) e (4.23).

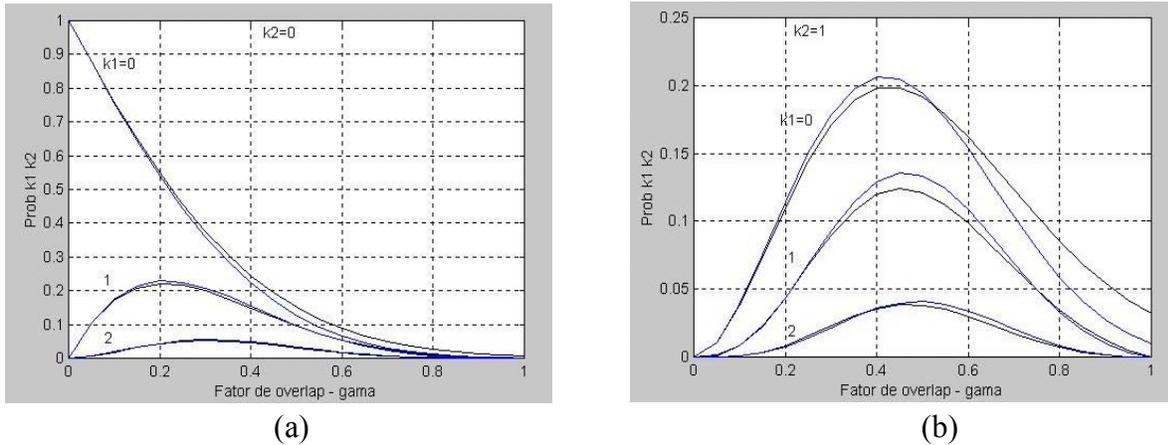


Figura 4.2 – Avaliação de  $p_{k_1, k_2}$  utilizando *Erlang-B* e Bernoulli

Estes gráficos foram obtidos fixando o valor de  $k_2$  igual a 0, para obter o gráfico da Figura 4.2(a) e  $k_2$  igual a 1, para obter o gráfico da Figura 4.2(b). Para os dois casos,  $k_1$  assume os valores 0, 1 e 2. Como pode ser observado pelos gráficos, os resultados obtidos são bastante próximos quando se utiliza distribuição de *Erlang-B* e *Binomial* para descrever o comportamento do tráfego nas células geradoras de tráfego de *soft handoff*. Como já verificado na Figura 3.7, para duas células, esta aproximação é melhor para valores de  $\gamma$  abaixo de 50%, que é o mais provável em sistemas celulares.

#### 4.4 Bloqueio de *soft handoff*

Nesta seção serão analisadas as condições da célula 3, célula alvo, para cursar o tráfego de *soft handoff* gerado pelos canais ativos nas regiões de sobreposição, devido às células 1 e 2. A primeira probabilidade a ser determinada será aquela onde existirá bloqueio devido à falta de canais para cursar o tráfego de *soft handoff* gerado nas regiões de sobreposição. Esta probabilidade é definida como a probabilidade de bloqueio de *soft handoff*. Portanto, o bloqueio de *soft handoff* diz respeito à chance de se estar em condição de *soft handoff* e de não existirem canais disponíveis na célula alvo para a realização do *soft handoff*.

A probabilidade de bloqueio de *soft handoff* é calculada considerando-se os casos onde o número de canais ocupados na célula alvo excede ao número de canais planejados para cursar seu tráfego. Quando se fala em tráfego da célula alvo, deve ser levado em consideração tanto o tráfego interno quanto o tráfego gerado nas regiões de sobreposição. Portanto, esta é a condição em que se trabalha com uma célula alvo com um número total de canais  $N_T$ , onde  $N_T$  é a soma dos  $N$  canais designados para cursar o tráfego interno da célula alvo mais  $N_{HO}$  canais designados para atender ao tráfego de *soft handoff* gerado nas regiões de sobreposição. Serão analisadas as condições em que o número de canais  $N_T$  da célula alvo é excedido. Neste caso haverá bloqueio de *soft handoff*, uma vez que não existem canais para cursar o tráfego de *soft handoff* gerado nas regiões de sobreposição entre as células. Vale atentar para o fato de que os  $N_T$  canais da célula 3 podem estar atendendo seu próprio tráfego, ou atendendo ao tráfego de *soft handoff* gerado pelas células vizinhas nas regiões de sobreposição. É importante observar que esta condição não discrimina se os canais ocupados são da própria célula 3 ou se oriundos das regiões de sobreposição.

A Tabela 4.1 mostra as condições onde haverá bloqueio de *soft handoff*. Para cada linha da tabela, a soma de canais ativos será maior que  $N_T$ , tanto devido a canais ativos na célula alvo, quanto a canais ativos nas regiões de sobreposição, ocasionando bloqueio de *soft handoff*. Nesta tabela foi utilizado o coeficiente  $k_x^y$ , onde  $y$  indica a célula geradora do tráfego de *soft handoff*, no caso célula 1 ou 2, e  $x$  indica a região de sobreposição, sendo  $x = 1$  entre duas células e  $x = 2$  entre três células.

Tabela 4.1

Célula 1		Célula 2		Célula 3
$k_1^1$	$k_2^1$	$k_2^2$	$k_1^2$	
1	0	0	0	$N_T$
0	1	0	0	$N_T$
0	0	1	0	$N_T$
0	0	0	1	$N_T$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	0	0	$N_T - 1$
1	0	1	0	$N_T - 1$
1	0	0	1	$N_T - 1$
0	1	1	0	$N_T - 1$
0	1	0	1	$N_T - 1$
0	0	1	1	$N_T - 1$
2	0	0	0	$N_T - 1$
0	2	0	0	$N_T - 1$
0	0	2	0	$N_T - 1$
0	0	0	2	$N_T - 1$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	1	0	$N_T - 2$
1	1	0	1	$N_T - 2$
1	0	1	1	$N_T - 2$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3	0	0	0	$N_T - 2$
0	3	0	0	$N_T - 2$
0	0	3	0	$N_T - 2$
0	0	0	3	$N_T - 2$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$N_T - 1$	0	0	1	1
$N_T$	0	0	0	1
0	$N_T$	0	0	1
0	0	$N_T$	0	1
0	0	0	$N_T$	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$N_T - 1$	1	0	0	1
$N_T - 2$	2	0	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$N_T$	0	$N_T$	0	1
$N_T$	0	0	$N_T$	1
0	$N_T$	$N_T$	0	1
0	$N_T$	0	$N_T$	1

A Tabela 4.2 sintetiza as condições de análise para se chegar a uma expressão que calcule o bloqueio de *soft handoff*. O número de canais ativos nas regiões de sobreposição, devido às células 1 ou 2, deve ser menor ou igual a  $N_T$ . Isto se justifica pois as células 1 e 2 possuem no máximo  $N_T$  canais alocados e não seria correto avaliar as probabilidades sem levar em consideração esta condição.

Tabela 4.2

Célula 1			Célula 2			Célula 3
Região 1 $k_1^1$	Região 2 $k_2^1$	Condição	Região 2 $k_2^2$	Região 3 $k_1^2$	Condição	
$1 \leq k_1^1 \leq N_T$	$1 \leq k_2^1 \leq N_T$	$k_1^1 + k_2^1 \leq N_T$	$1 \leq k_2^2 \leq N_T$	$1 \leq k_1^2 \leq N_T$	$k_2^2 + k_1^2 \leq N_T$	$N_T$
$2 \leq k_1^1 \leq N_T$	$2 \leq k_2^1 \leq N_T$	$k_1^1 + k_2^1 \leq N_T$	$2 \leq k_2^2 \leq N_T$	$2 \leq k_1^2 \leq N_T$	$k_2^2 + k_1^2 \leq N_T$	$N_T-1$
$3 \leq k_1^1 \leq N_T$	$3 \leq k_2^1 \leq N_T$	$k_1^1 + k_2^1 \leq N_T$	$3 \leq k_2^2 \leq N_T$	$3 \leq k_1^2 \leq N_T$	$k_2^2 + k_1^2 \leq N_T$	$N_T-2$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$N_T \leq k_1^1 \leq N_T$	$N_T \leq k_2^1 \leq N_T$	$k_1^1 + k_2^1 \leq N_T$	$N_T \leq k_2^2 \leq N_T$	$N_T \leq k_1^2 \leq N_T$	$k_2^2 + k_1^2 \leq N_T$	1

A expressão para o cálculo da probabilidade de *soft handoff* é obtida da Tabela 4.2. Obtém-se primeiramente uma expressão geral, da qual são descartadas as parcelas onde não haja bloqueio de *soft handoff*. A expressão geral é dada por:

$$\text{Probabilidade sem aplicação das condições} = \sum_{q=1}^{N_T} \sum_{k_1^1=0}^{N_T} \sum_{k_2^1=0}^{N_T-k_1^1} \sum_{k_1^2=0}^{N_T} \sum_{k_2^2=0}^{N_T-k_1^2} p_{k_1^1, k_2^1} p_{k_1^2, k_2^2} p_{n=N_T-q+1} \quad (4.24)$$

A probabilidade  $p_{k_1^1, k_2^1}$  refere-se à probabilidade de canais ativos nas regiões de sobreposição referentes à célula 1. A probabilidade  $p_{k_1^2, k_2^2}$  é a mesma para a célula 2. A probabilidade  $p_n$  refere-se ao comportamento de tráfego na célula 3, ou seja, na célula alvo, onde é utilizada a distribuição de *Erlang-B*. Embora tenha sido utilizada alternativamente a distribuição *Binomial* para o comportamento da atividade de canais nas células vizinhas 1 e 2, para otimização de tempo computacional, o mesmo não será feito

para a atividade de canais na célula 3, sendo utilizada somente *Erlang-B* para descrever este comportamento.

Para as regiões de sobreposição, é atendida a exigência de o número de canais ativos devido à célula 1 ou 2 não ultrapassar  $N_T$ . Esta condição é conseguida fazendo os coeficientes das somatórias referentes às regiões de sobreposição de cada célula 1 ou 2 variarem segundo os seguintes critérios:

$$\begin{aligned} \text{Célula 1} &\rightarrow k_1^1 \text{ variando de } 0 \text{ a } N_T \text{ e } k_2^1 \text{ variando de } 0 \text{ a } N_T - k_1^1 \\ \text{Célula 2} &\rightarrow k_1^2 \text{ variando de } 0 \text{ a } N_T \text{ e } k_2^2 \text{ variando de } 0 \text{ a } N_T - k_1^2 \end{aligned}$$

As parcelas que não causam bloqueio de *soft handoff* devem ser eliminadas. No cálculo esta condição de descarte segue a seguinte regra:

$$\text{Se } k_1^1 + k_2^1 + k_1^2 + k_2^2 + n \leq N_T, \text{ a parcela deve ser descartada.}$$

O programa para cálculo desta probabilidade foi implementado considerando as condições estabelecidas pela Tabela 4.2.

#### **4.5 Probabilidade de outage**

Neste item a questão da interferência é analisada do ponto de vista das probabilidades envolvidas para um arranjo de três células, com regiões de sobreposição entre duas e três células. Nestas regiões o móvel pode estar conectado a duas ou três estações rádio base. Na seção 3.4 foram utilizadas duas abordagens para determinação da probabilidade de *outage* para o caso de duas células. Ficou demonstrado que as duas abordagens levam a um mesmo resultado. Sendo assim, para três células somente será determinada a probabilidade de *outage* pela primeira abordagem, como feito na seção 3.4.1.

##### **4.5.1 Cálculo da Probabilidade de Outage**

A probabilidade de *outage* será calculada como a soma da probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, já determinada na seção 4.4, e a probabilidade de excesso, que será determinada logo a seguir. Na verdade, a probabilidade de excesso é a probabilidade de *outage* admitindo a perda da ligação na ausência de canais livres na célula alvo. Sendo assim:

$$P_{out} = P_{exc} + P_{HO} \quad (4.25)$$

A probabilidade de excesso é calculada considerando-se os casos onde o número de canais ocupados na célula alvo excede ao número de canais internos  $N$ , até um total de  $N_T$  canais. O número de canais  $N$  pode ser excedido, seja para atendimento de tráfego da própria célula alvo, seja para atendimento de tráfego de *soft handoff* gerado pelas células vizinhas nas regiões de sobreposição.

Para se determinar a expressão que estime a probabilidade de excesso será feita uma análise considerando-se o número de canais ocupados da célula 3 acima do número de  $N$  canais, ou seja, configurando o excesso de canais. Este excesso será por canais ativos na própria célula 3 mais os canais devido às células 1 e 2, que irão contribuir com canais ativos em *soft handoff* nas regiões de sobreposição. As condições de excesso são aquelas em que o número de canais na célula 3 vão de  $N+1$  até  $N_T$ . Para cada uma das condições, deve-se avaliar os canais nas regiões de sobreposição e na célula 3. Para facilitar a análise é utilizado o coeficiente  $n$ , como sendo o número de canais ocupados na célula 3, e o coeficiente  $q$  cujo valor vai variar de  $N+1$  até  $N_T$ . Com estes dois coeficientes e mais os coeficientes que representam os canais ativos nas regiões de sobreposição, chega-se à expressão do número de canais internos na célula 3, ou seja:

$$n = q - k_1^1 - k_2^1 - k_1^2 - k_2^2 \quad (4.26)$$

Deve-se, agora, analisar as condições onde haverá excesso na célula 3. Para verificar esta condição, faz-se a análise do comportamento dos coeficientes de canais ativos nas regiões de sobreposição,  $k_1^1, k_2^1, k_1^2$  e  $k_2^2$ . Abaixo seguem as condições de excesso com suas respectivas expressões para cálculo da probabilidade. Ao final, chega-se à expressão

da probabilidade de excesso. Serão analisadas as condições para a célula 3 com  $N_T$ ,  $N_T-1$  e  $N+1$  canais ativos. Com estas condições, chega-se à lei de formação que permitirá obter a expressão desejada.

**a. Célula 3 com  $N_T$  canais ocupados**

São consideradas as condições onde a célula 3 terá  $q=N_T$  canais ocupados, seja para tráfego interno da própria célula 3, seja para tráfego de *soft handoff* gerado pelas células vizinhas nas regiões de sobreposição. A Tabela 4.3 mostra esta condição.

Tabela 4.3

Célula 1		Célula 2		Célula 3
$k_1^1$	$k_2^1$	$k_2^2$	$k_1^2$	
0	0	0	0	$N_T$
1	0	0	0	$N_T - 1$
0	1	0	0	$N_T - 1$
0	0	1	0	$N_T - 1$
0	0	0	1	$N_T - 1$
1	1	0	0	$N_T - 2$
1	0	1	0	$N_T - 2$
1	0	0	1	$N_T - 2$
0	1	1	0	$N_T - 2$
0	1	0	1	$N_T - 2$
0	0	1	1	$N_T - 2$
2	0	0	0	$N_T - 2$
0	2	0	0	$N_T - 2$
0	0	2	0	$N_T - 2$
0	0	0	2	$N_T - 2$
1	1	1	0	$N_T - 3$
1	1	0	1	$N_T - 3$
1	0	1	1	$N_T - 3$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3	0	0	0	$N_T - 3$
0	3	0	0	$N_T - 3$
0	0	3	0	$N_T - 3$
0	0	0	3	$N_T - 3$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$N_T - 1$	0	0	1	0
$N_T$	0	0	0	0
0	$N_T$	0	0	0
0	0	$N_T$	0	0
0	0	0	$N_T$	0

É interessante observar que não existe bloqueio de *soft handoff* em nenhuma das linhas da tabela, existindo somente excesso. Na tabela foram analisadas as condições onde existem  $N_T$  canais ativos na célula 3. A expressão geral para cálculo desta probabilidade é a seguinte:

$$P_{N_T} = \sum_{k_1^1=0}^{N_T} \sum_{k_2^1=0}^{N_T-k_1^1} \sum_{k_1^2=0}^{N_T-k_1^1-k_2^1} \sum_{k_2^2=0}^{N_T-k_1^1-k_2^1-k_1^2} P_{k_1^1, k_2^1} P_{k_1^2, k_2^2} P_{n=q-k_1^1-k_2^1-k_1^2-k_2^2} \quad (4.27)$$

Esta expressão avalia as condições da tabela onde o número de canais ativos na célula 3 é  $N_T$  canais.

#### **b. Célula 3 com $N_T-1$ canais ocupados**

São consideradas as condições onde a célula 3 terá  $q = N_T - 1$  canais ocupados, seja para tráfego interno da própria célula 3, seja para tráfego de *soft handoff* gerado pelas células vizinhas, nas regiões de sobreposição. A Tabela 4.4 mostra esta condição.

Tabela 4.4

Célula 1		Célula 2		Célula 3
$k_1^1$	$k_2^1$	$k_2^2$	$k_1^2$	
0	0	0	0	$N_T-1$
1	0	0	0	$N_T-2$
0	1	0	0	$N_T-2$
0	0	1	0	$N_T-2$
0	0	0	1	$N_T-2$
1	1	0	0	$N_T-3$
1	0	1	0	$N_T-3$
1	0	0	1	$N_T-3$
0	1	1	0	$N_T-3$
0	1	0	1	$N_T-3$
0	0	1	1	$N_T-3$
2	0	0	0	$N_T-3$
0	2	0	0	$N_T-3$
0	0	2	0	$N_T-3$
0	0	0	2	$N_T-3$
1	1	1	0	$N_T-4$
1	1	0	1	$N_T-4$
1	0	1	1	$N_T-4$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3	0	0	0	$N_T-4$
0	3	0	0	$N_T-4$
0	0	3	0	$N_T-4$
0	0	0	3	$N_T-4$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$N_T-1$	0	0		0
0	$N_T-1$	0	0	0
0	0	$N_T-1$	0	0
0	0	0	$N_T-1$	0

Ressalta-se que não existe bloqueio de *soft handoff* em nenhuma das linhas da tabela, existindo somente excesso. Na tabela foram analisadas as condições onde existem  $N_T-1$  canais ativos na célula 3. A expressão geral para cálculo desta probabilidade é a seguinte:

$$p_{N_T-1} = \sum_{k_1^1=0}^{N_T-1} \sum_{k_2^1=0}^{N_T-1-k_1^1} \sum_{k_1^2=0}^{N_T-1-k_1^1-k_2^1} \sum_{k_2^2=0}^{N_T-1-k_1^1-k_2^1-k_1^2} p_{k_1^1, k_2^1} p_{k_1^2, k_2^2} p_{n=q-k_1^1-k_2^1-k_1^2-k_2^2} \quad (4.28)$$

Esta expressão avalia as condições da tabela onde o número de canais ativos na célula 3 é  $N_T - 1$ .

**c. Célula 3 com  $N+1$  canais ocupados**

São consideradas as condições onde a célula 3 terá  $q=N+1$  canais ocupados, seja para tráfego interno da própria célula 3, seja para tráfego de *soft handoff* gerado pelas células vizinhas nas regiões de sobreposição. A Tabela 4.5 mostra esta condição.

Tabela 4.5

Célula 1		Célula 2		Célula 3 n
$k_1^1$	$k_2^1$	$k_2^2$	$k_1^2$	
0	0	0	0	N+1
1	0	0	0	N
0	1	0	0	N
0	0	1	0	N
0	0	0	1	N
1	1	0	0	N-1
1	0	1	0	N-1
1	0	0	1	N-1
0	1	1	0	N-1
0	1	0	1	N-1
0	0	1	1	N-1
2	0	0	0	N-1
0	2	0	0	N-1
0	0	2	0	N-1
0	0	0	2	N-1
1	1	1	0	N-2
1	1	0	1	N-2
1	0	1	1	N-2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3	0	0	0	N-2
0	3	0	0	N-2
0	0	3	0	N-2
0	0	0	3	N-2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
N+1	0	0	0	0
0	N+1	0	0	0
0	0	N+1	0	0
0	0	0	N+1	0

Pode-se observar que não existe bloqueio de *soft handoff* em nenhuma das linhas da tabela, existindo somente excesso. Na tabela acima foram analisadas as condições onde existem  $N+1$  canais ativos na célula 3. A expressão geral para cálculo desta probabilidade é a seguinte:

$$p_{N+1} = \sum_{k_1^1=0}^{N+1} \sum_{k_2^1=0}^{N+1-k_1^1} \sum_{k_1^2=0}^{N+1-k_1^1-k_2^1} \sum_{k_2^2=0}^{N+1-k_1^1-k_2^1-k_1^2} P_{k_1^1, k_2^1} P_{k_1^2, k_2^2} P_{n=q-k_1^1-k_2^1-k_1^2-k_2^2} \quad (4.29)$$

Esta expressão avalia as condições da tabela onde o número de canais ativos na célula 3 é  $N+1$ .

As Expressões (4.27), (4.28) e (4.29) são utilizadas para obter a expressão da probabilidade de excesso. Após estas considerações, a expressão da probabilidade de excesso é dada por:

$$p_{exc} = \sum_{q=N+1}^{N_T} \sum_{k_1^1=0}^q \sum_{k_2^1=0}^{q-k_1^1} \sum_{k_1^2=0}^{q-k_1^1-k_2^1} \sum_{k_2^2=0}^{q-k_1^1-k_2^1-k_1^2} P_{k_1^1, k_2^1} P_{k_1^2, k_2^2} P_{n=q-k_1^1-k_2^1-k_1^2-k_2^2} \quad (4.30)$$

A probabilidade de excesso pode ser interpretada como o caso em que se admite a perda da ligação na ausência de canais livres na outra célula para cursar o tráfego de *soft handoff*. Adicionando a esta probabilidade de excesso (4.30) a probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, obtém-se a expressão da probabilidade de *outage*, como estabelecido pela Expressão (4.25).

Assim, chega-se à probabilidade de *outage*. Para o cálculo desta probabilidade é necessário o cálculo individual de cada uma das parcelas, probabilidade de excesso e probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, tendo em vista a complexidade das expressões. Um teste importante é verificar se a soma de todas as probabilidades tem como resultados a unidade, e neste teste foi feito isso, chegando-se efetivamente à unidade.

## 4.6 Conclusão

Neste capítulo foram consolidados os conceitos e expressões para três células. Um fato a se notar é o aumento da complexidade das expressões para cálculo das probabilidades de *outage* e *soft handoff*, se comparado ao caso de duas células. Em função desta complexidade, a utilização da distribuição *Binomial*, para representar o comportamento de tráfego nas células geradoras de tráfego de *soft handoff*, passa a ser uma necessidade, em função do tempo para o cálculo das probabilidades.

A generalização do caso de duas células para três células permite uma extrapolação para qualquer número de células e regiões de sobreposição. Uma consequência do aumento do número de célula será o aumento da complexidade das expressões e um conseqüente aumento do tempo para cálculo das probabilidades. Sendo assim, a distribuição *Binomial* é um recurso de crucial importância. Ressalta-se que não foi utilizado *Binomial* para representar o tráfego na célula alvo. Aplicando *Binomial*, também, neste caso, existe uma expectativa de diminuição adicional no tempo de cálculo. Esta é uma alternativa a ser desenvolvida em trabalhos futuros.



## 5 Estratégias de Alocação de Canais

### 5.1 Introdução

Nos Capítulos 3 e 4 foram desenvolvidas, respectivamente, as expressões das probabilidades de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage*, para os arranjos de duas e três células. No presente capítulo, são apresentadas e analisadas estratégias de alocação de canais na célula alvo, com as quais serão avaliadas as expressões desenvolvidas nos capítulos anteriores. A questão central é o dimensionamento do sistema, levando-se em consideração as probabilidades de existir bloqueio na realização do *soft handoff* e probabilidade de *outage*. Os itens seguintes apresentam os resultados das estratégias de alocação de canais para o arranjo de duas células e, em seguida, para o arranjo de três células.

O *handoff* é uma operação importante em qualquer sistema celular. Para o sistema CDMA, esta operação ganha importância ainda maior em função de o usuário utilizar recurso do sistema, em excesso a um mínimo necessário. Este fato afeta fortemente o dimensionamento do sistema, que deverá suportar esta operação e atender a requisitos de qualidade de serviço. É importante notar que mais crítico que o bloqueio na originação de uma chamada, é a queda de chamada em curso por falta de canal na operação de *soft handoff*. A contribuição deste trabalho é no sentido de definir novos parâmetros que devem ser levados em consideração no planejamento de sistemas celulares CDMA.

Tanto no Capítulo 3, quanto no Capítulo 4, foram apresentadas as distribuições de *Erlang-B* e *Binomial*, para representar o tráfego gerado nas regiões de sobreposição devido às células vizinhas. Os resultados obtidos, utilizando estas duas distribuições, aproximam-se bastante, principalmente para regiões de sobreposição menores que 50%, que é o caso mais comum em sistemas celulares. Para demonstrar esta aproximação, será feita uma comparação dos resultados obtidos para cada uma das distribuições na primeira e segunda estratégias de alocação. Com isto, fica demonstrada a possibilidade de utilização da

*Binomial*. Após esta verificação, para a terceira estratégia, somente será utilizada a *Binomial*.

## **5.2 Estratégias de Alocação**

Este item apresenta as condições de análise para obtenção dos resultados. Trabalha-se, primordialmente, com a questão de interferência que, em sistemas CDMA, leva a uma degradação suave à medida em que vai aumentando a interferência. No sistema CDMA, um móvel na periferia da célula contribui com uma grande parcela de interferência na outra célula, o que proporciona uma diminuição da capacidade como um todo. O fato de este móvel poder se comunicar com mais de uma célula, pode ser utilizado em benefício do sistema, diminuindo-se a potência do móvel e combinando-se os sinais provenientes deste móvel nas bases para se obter um nível adequado de recepção. Neste sentido, mais do que uma prerrogativa ou uma regalia dos sistemas CDMA, o *soft handoff* é uma necessidade. Utiliza-se, aqui, os conceitos de tráfego aparente e tráfego real, já apresentados no Capítulo 2. A determinação do tráfego real, na metodologia proposta, será consequência tanto do bloqueio de *soft handoff* quanto da interferência. Um usuário na condição de *soft handoff* utiliza mais recursos do que um mínimo necessário, traduzindo-se na necessidade de mais canais. Para o dimensionamento de canais para satisfazer a condição de *soft handoff*, utiliza-se um número nominal de canais  $N$  com um tráfego  $A$  para um bloqueio  $B$ . Este tráfego é denominado de aparente. A carga aparente é obtida pela fórmula de *Erlang-B*, para um dado grau de serviço e um número de canais, para o qual o nível de interferência encontra-se em patamares aceitáveis. Esta condição de interferência foi tratada no Capítulo 2. Aqui somente será considerado que existe um número nominal de canais  $N$ , acima do qual a interferência não pode ser desconsiderada. Para valores maiores que  $N$ , isto não significa que o sistema deixe de operar e, sim, uma condição de interferência que degrada suavemente a comunicação com o aumento de  $N$ . Resta, portanto, verificar as probabilidades envolvidas nesta condição. Joga-se, assim, com as probabilidades de existir interferência e a probabilidade de ocorrer bloqueio de *soft handoff*. A questão, neste caso, é determinar a probabilidade da ocorrência dos eventos quando é excedido este número de canais  $N$ . No Capítulo 2, seção 2.4, foi determinada a condição onde a interferência pode

ser desprezada. A título de exemplo, esta condição nominal considera um tráfego  $A$  de 11,5 *erlangs* e uma probabilidade de bloqueio  $B$  de 2%. Utilizando-se a tabela de *Erlang-B*, chega-se a 18 canais. Esta é a condição nominal utilizada neste capítulo. Embora este número tenha sido encontrado por setor, será utilizado aqui para célula, não afetando a proposta do trabalho.

Nas estratégias de planejamento propostas, para um fator  $\gamma$  de sobreposição entre células, adicionam-se ou subtraem-se canais aos  $N$  canais nominais, para atender aos requisitos de probabilidade de bloqueio de *soft handoff* e de *outage*. Nota-se que, ao se acrescentarem canais aos canais nominais, a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* deverá diminuir. Por outro lado, a probabilidade de interferência deverá aumentar, ou seja, a probabilidade de *outage* deverá aumentar. No outro extremo, apenas subtraindo-se canais dos canais nominais, técnica aplicada comumente, a interferência não ultrapassará àquela obtida com o uso de canais nominais, mas a capacidade final do sistema diminuirá para se atingir a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* desejada. Um compromisso entre adicionar-se e subtrair-se uma quantidade adequada de canais em torno dos canais nominais poderá ser atingido, para se atender aos critérios de projeto de sistema no que diz respeito à questão da interferência e do bloqueio de *soft handoff*. A estratégia de planejamento proposta se presta a este objetivo, à medida em que define novos parâmetros a serem considerados, probabilidade de bloqueio de *soft handoff* e probabilidade de *outage*.

A seguir são apresentadas as três estratégias de alocação de canais. Trabalha-se com uma célula alvo, onde serão analisadas as probabilidades de bloqueio de *soft handoff* e *outage*, sendo que as outras células vizinhas funcionam como geradoras de tráfego de *soft handoff* nas regiões de sobreposição. Para tal, serão utilizadas as distribuição de *Erlang-B* e *Binomial* para o tráfego nas células vizinhas geradoras de tráfego de *soft handoff*. Para os propósitos desta técnica,  $N$  é o número nominal de canais para o qual a interferência pode ser desprezada;  $N_T$  é o número total de canais alocados na célula e  $N_{INT}$ , o número de canais para atendimento do tráfego interno na célula alvo.

### 5.2.1 Estratégia de Alocação 1 - Aumento de Canais

Nesta estratégia de alocação, parte-se do número nominal de canais  $N$  e são acrescentados canais chegando-se a  $N_T$  canais alocados na célula alvo. Deve-se, agora, analisar as consequências deste aumento do número de canais alocados na célula, relativamente à probabilidade de bloqueio de *soft handoff* e à probabilidade de *outage*. Nota-se que, neste tipo de estratégia, o número de canais internos se confunde com o número nominal de canais  $N$ , isto é,  $N_{INT}=N$ .

Quanto ao tráfego de *soft handoff* gerado nas regiões de sobreposição, existirá disputa para alocação de canais para cursar este tráfego, resultando num certo bloqueio de *soft handoff*. Esta disputa está relacionada diretamente com a proporção de sobreposição entre células. O bloqueio de *soft handoff* surge da insuficiência de canais para atender este tráfego de *soft handoff*, havendo com isto uma certa probabilidade de bloqueio de *soft handoff*.

Parte-se, nesta estratégia, para o aumento do número de canais alocados na célula alvo no sentido de atender ao tráfego de *soft handoff*. O aumento do número de canais traz, como expectativa, uma diminuição da probabilidade de bloqueio de *soft handoff*. Porém, com o aumento do número de canais alocados na célula, existirá a probabilidade de canais ativos em excesso, causando interferência. Esta probabilidade de ocorrer interferência será avaliada pela probabilidade de *outage*. A probabilidade de bloqueio na célula permanece a mesma, uma vez que não é alterado o número nominal de canais  $N$  para atender ao tráfego na célula e, conseqüentemente, o tráfego aparente permanece constante. Esta técnica de alocação se aplicaria aos casos onde existe a necessidade de diminuição da probabilidade de bloqueio de *soft handoff*.

A Figura 5.1 ilustra esta estratégia, ou seja, parte-se de um valor nominal de canais  $N$  e são acrescentados canais, chegando-se a  $N_T$  canais alocados na célula. Na figura está também apresentada a expectativa quanto às probabilidades de bloqueio, bloqueio de *soft handoff* e *outage*.

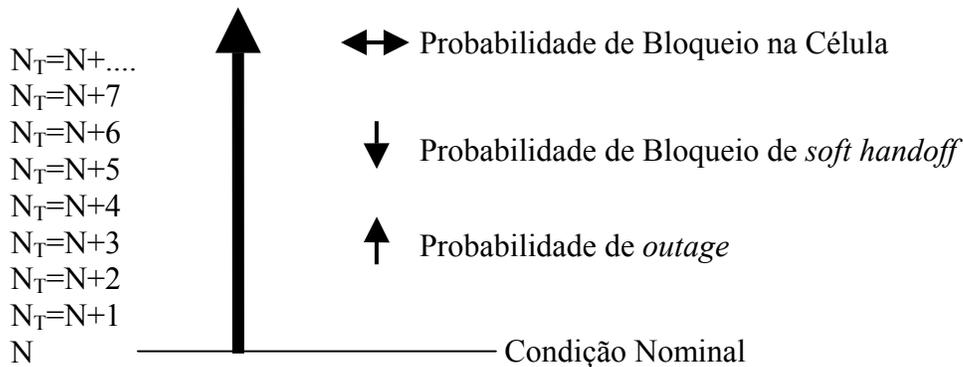


Figura 5.1 – Estratégia de Alocação 1

A estratégia apresentada na Figura 5.1 será utilizada para arranjos de duas e três células. Serão avaliadas as probabilidades de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage* em função da proporção de sobreposição  $\gamma$  e do número total de canais  $N_T$  alocados na célula.

### 5.2.2 Estratégia de Alocação 2 – Diminuição de Canais

Neste tipo de alocação parte-se novamente da condição nominal com  $N$  canais alocados na célula alvo. Porém, neste caso, o valor nominal de canais é mantido como o valor máximo e considerado como sendo  $N_T$ , ou seja, o valor total de canais alocados na célula alvo. Deste valor são subtraídos canais que se prestam para atendimento do tráfego de *soft handoff*.

Portanto, tem-se para esta técnica  $N_T = N$ . Com a diminuição do número de canais alocados, haverá uma conseqüente diminuição do tráfego aparente. Assim, teremos um número de canais  $N_{INT}$  para cursar o tráfego da célula. A diferença de canais  $N_T - N_{INT}$  será destinada para cursar o tráfego de *soft handoff*. Variando-se a proporção  $\gamma$  de sobreposição entre células, avalia-se a probabilidade de bloqueio de *soft handoff*. Observar que, nesta estratégia, não se ultrapassa o número nominal de canais, pois  $N_T = N$ . Sendo assim, não ocorrerá o caso de interferência, sendo esta desprezada. Portanto, a probabilidade de

bloqueio de *soft handoff* será a única a ser avaliada, pois a probabilidade de *outage* não se aplica, uma vez que não é ultrapassada a condição nominal.

Na Figura 5.2 estão apresentadas as condições a serem analisadas nos arranjos de 2 e 3 células.

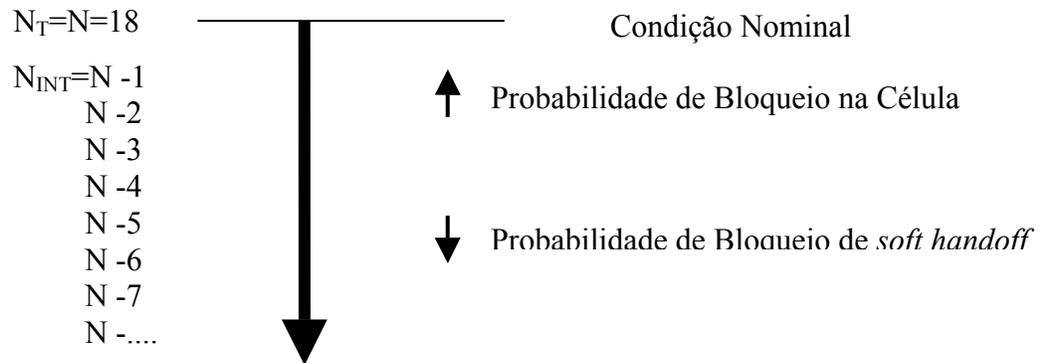


Figura 5.2 – Estratégia de Alocação 2

Espera-se, neste caso, uma diminuição da probabilidade de bloqueio de *soft handoff* e um conseqüente aumento na probabilidade de bloqueio na célula, provocando, assim, uma diminuição no tráfego aparente na célula, para manutenção do bloqueio em 2%. Esta situação se contrasta com a técnica de alocação apresentada na seção 5.2.1, pois naquele caso o número de canais para cursar o tráfego aparente é mantido constante. Esta técnica, apresentada na Figura 5.2, é utilizada comumente no planejamento de sistemas celulares CDMA.

### 5.2.3 Estratégia de Alocação 3 - Aumentando e Diminuindo os Canais

Nas duas técnicas de alocação apresentadas anteriormente, foram utilizadas estratégias opostas, com características bastante diferentes. Aqui é apresentada uma estratégia que utiliza os dois princípios, onde são acrescentados canais aos  $N$  nominais para cursar o tráfego de *soft handoff* e, também, é feita a subtração de canais em relação aos nominais para cursar

o tráfego na célula. Neste tipo de alocação parte-se, também, da condição nominal com  $N$  canais.

A diminuição do número de canais para cursar o tráfego da célula, ocasiona uma diminuição do tráfego aparente, uma vez que existirão menos canais para cursar o tráfego da célula. Por outro lado, existe o aumento do número de canais para cursar o tráfego de *soft handoff*. A estratégia proposta segue, portanto, um processo onde são somados canais aos nominais e verificada a condição de probabilidade de bloqueio de *soft handoff* e de probabilidade de *outage*, quando da diminuição de canais alocados para cursar o tráfego interno na célula alvo. A Figura 5.3 mostra este tipo de estratégia de alocação.

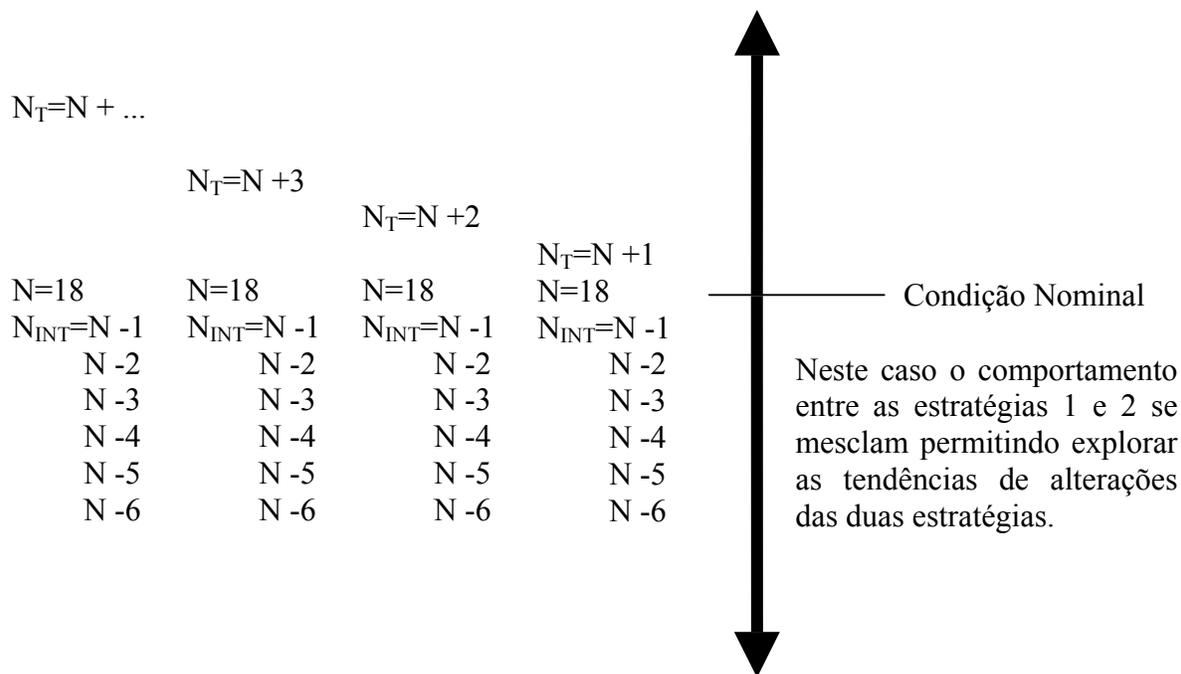


Figura 5.3 – Estratégia de Alocação 3

A cada etapa de adição de canais aos nominais, é feita a avaliação das probabilidades envolvidas diminuindo-se, assim, os canais alocados para cursar o tráfego

interno. O processo é repetido até obter-se uma condição satisfatória, tanto com relação ao bloqueio de *soft handoff*, quanto em relação à probabilidade de *outage*.

### **5.3 Resultados para Duas Células**

Nesta seção serão utilizadas as estratégias de alocação apresentadas na seção 5.2, para o caso de 2 células. Para avaliação das probabilidades na estratégia de alocação 1, serão utilizadas as distribuições de *Erlang-B* e *Binomial*, para descrever o comportamento do tráfego nas células vizinhas. Será feita uma comparação dos resultados obtidos para cada uma das distribuições demonstrando, assim, a proximidade dos resultados. Esta aproximação é melhor para valores de sobreposição menores que 50%. Para as outras estratégias somente será utilizada a distribuição *Binomial* para descrever o comportamento do tráfego na célula vizinha.

A condição nominal, em relação à qual foram gerados os resultados para duas células, é a seguinte:

$N=18$  canais,

$B=2\%$  e

$A=11,5$  erlangs.

Como mencionado anteriormente, esta é a condição onde a interferência provocada pelos usuários pode ser desprezada. A seguir, são obtidos os resultados para cada uma das estratégias mostradas na seção 5.2.

#### **5.3.1 Estratégia de Alocação 1 - Aumento de Canais**

Para esta estratégia serão avaliadas as probabilidades de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage*. O número total de canais alocados na célula alvo será de  $N_T=19, 20, 21, 22, 23$  e  $24$ . As probabilidades são obtidas em função da proporção de área da região de

sobreposição, que varia de 0 a 100%. A seguir, são obtidos os resultados para a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* e a probabilidade de *outage*.

### Bloqueio de *Soft handoff*

A Figura 5.4 apresenta o comportamento da probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, utilizando-se a distribuição de *Erlang-B*.

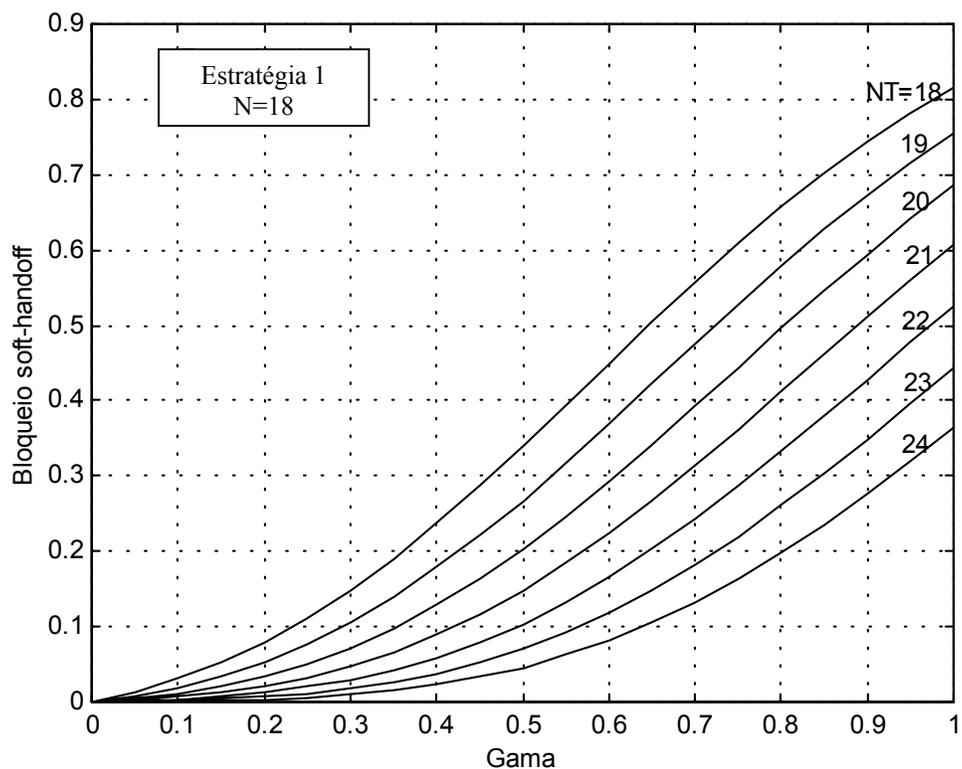


Figura 5.4 – Bloqueio de *soft handoff* utilizando *Erlang-B* – duas células – aumento de canais

A Figura 5.5 apresenta a probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, utilizando a *Binomial* para descrever o comportamento do tráfego nas células vizinhas.

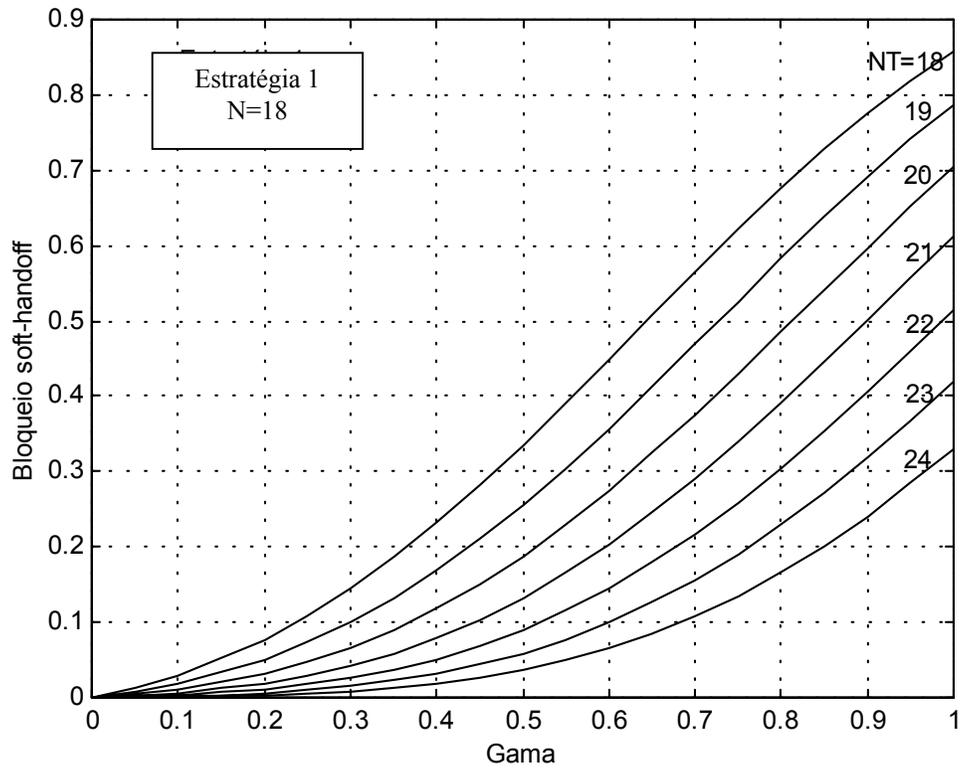


Figura 5.5 – Bloqueio de *soft handoff* utilizando *Binomial* – duas células – aumento de canais

A Figura 5.6 apresenta uma comparação entre os dois resultados obtidos para a probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, utilizando as distribuições de *Erlang-B* e *Binomial*.

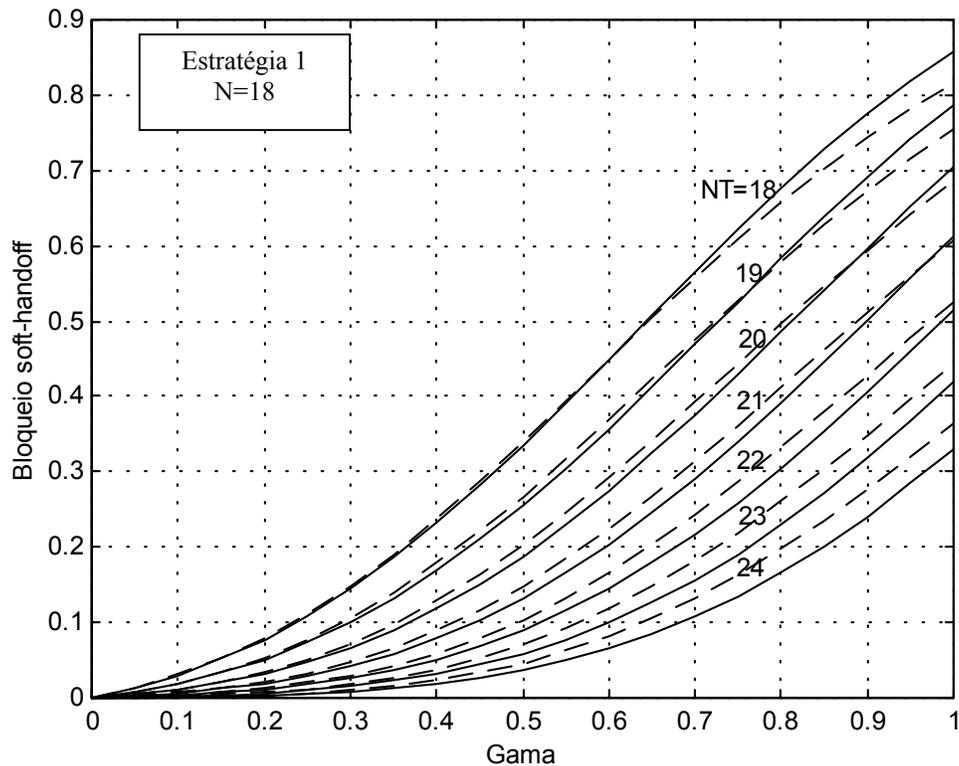


Figura 5.6 – Comparação entre *Erlang-B* e *Binomial* – duas células – aumento de canais

Como pode ser observado na Figura 5.6, os resultados são muito próximos. Esta aproximação é melhor para valores de  $\gamma$  abaixo de 50%, sendo estes valores abaixo de 50% mais frequentes em sistemas celulares.

Analisando-se o comportamento da probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, é possível observar, como era de se esperar, que à medida em que a região de sobreposição aumenta, também aumenta a probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, para um certo número de canais alocados. Sem área de sobreposição entre as células, ou seja, para  $\gamma=0$ , a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* é igual a zero. Este resultado é coerente, uma vez que não existe probabilidade de canais ativos na região de sobreposição. Quando são acrescentados canais aos nominais, a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* sofre também uma redução. Como exemplo, para  $\gamma=0,4$ , a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* para os vários  $N_T$  está mostrada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1

$N_T$	Prob. Bloqueio de <i>Soft handoff</i> (%)
18	24
19	17
20	12
21	9
22	5
24	2

Os resultados mostram que, para uma certa área de sobreposição, à medida em que se aumenta o número de canais totais, diminuir-se-á o bloqueio de *soft handoff*, como era de se esperar. Por outro lado, para um certo número de canais  $N_T$  fixo, à medida em que aumenta a área de sobreposição  $\gamma$ , o bloqueio aumentará, uma vez que quanto maior a área de sobreposição maior a probabilidade de existirem canais ativos na área de sobreposição.

### **Probabilidade de Excesso**

A probabilidade de excesso, utilizando *Erlang-B*, está mostrada na Figura 5.7.

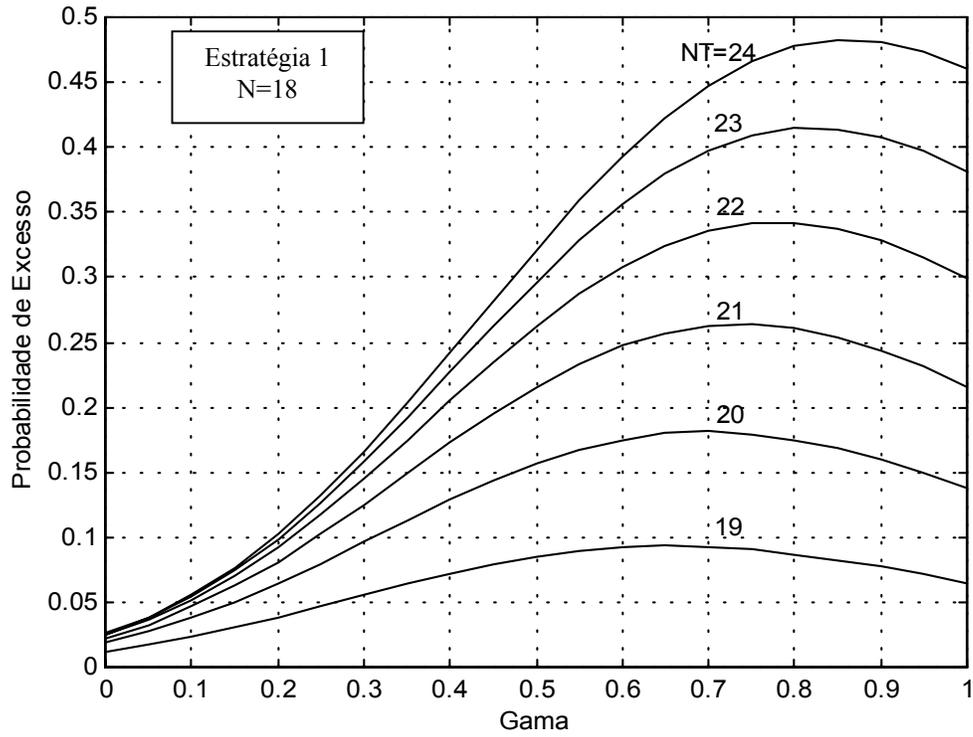


Figura 5.7 – Probabilidade de Excesso utilizando *Erlang-B* – duas células – aumento de canais

A probabilidade de excesso, utilizando *Bernoulli*, está mostrada na Figura 5.8.

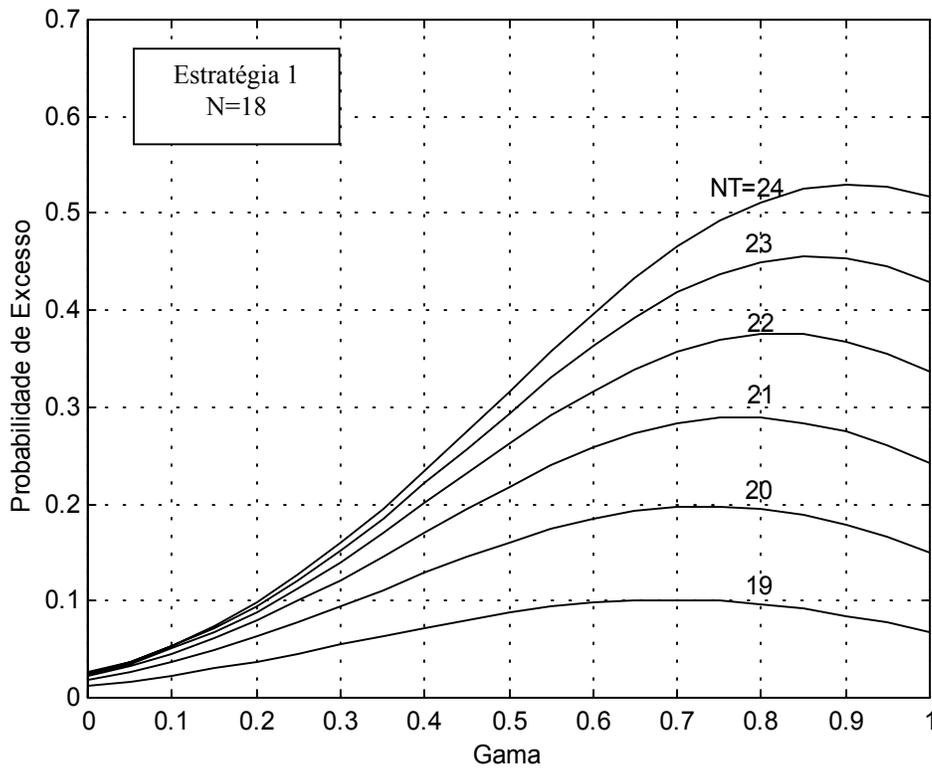


Figura 5.8 – Probabilidade de Excesso utilizando *Bernoulli* – duas células – aumento de canais

A Figura 5.9 compara dois resultados da probabilidade excesso para *Erlang-B* e *Bernoulli*. É interessante observar que se repete a aproximação obtida para o Bloqueio de *soft handoff*.

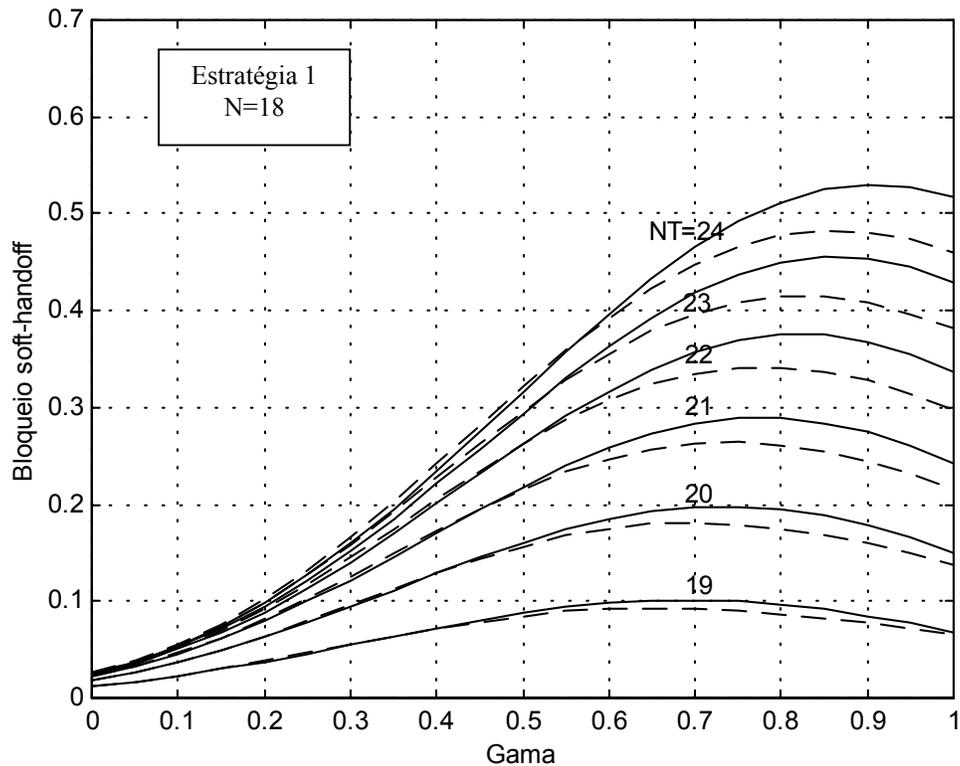


Figura 5.9 – Probabilidade de Excesso utilizando *Erlang* e *Binomial* – duas células – aumento de canais

Pode-se observar que a probabilidade de excesso, para  $N=18$ , é zero. Este resultado era esperado, uma vez que, para este valor, a interferência é desprezada. O comportamento da probabilidade de excesso é oposto ao da probabilidade de bloqueio de *soft handoff*. À medida em que são acrescentados canais aos nominais, existe um aumento da probabilidade de excesso, como pode ser verificado na Figura 5.7.

## Probabilidade de *Outage*

A probabilidade de *outage*, utilizando *Erlang-B*, está apresentada na Figura 5.10.

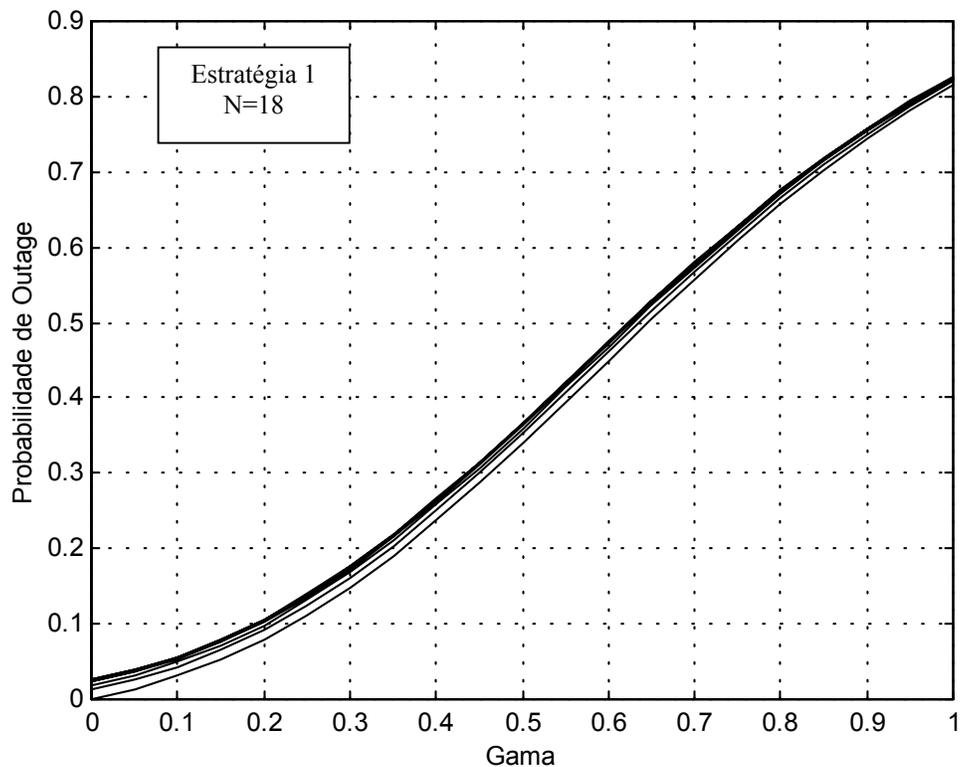


Figura 5.10 – Probabilidade de *Outage* utilizando *Erlang-B* – Estratégia 1

Pelo resultado, não existe diferença significativa da probabilidade de *outage* com o aumento do número de canais alocados na célula. Este resultado é interessante, uma vez que mostra que, para esta estratégia, a probabilidade de *outage* é a mesma, independente do número de canais alocados na célula. Este fato pode ser explicado pois, na medida em que são acrescentados canais, existe uma diminuição da probabilidade de bloqueio de *soft handoff* e um aumento da probabilidade de excesso, como pode ser verificado nas Figuras 5.4 e 5.7, em que a probabilidade de *outage* é a soma destas duas probabilidades.

A Figura 5.11 apresenta a probabilidade de *outage* utilizando *Binomial* e a Figura 5.12 apresenta a comparação entre *Erlang-B* e *Binomial*. É interessante observar a grande aproximação entre os resultados obtidos para *Erlang-B* e *Binomial*.

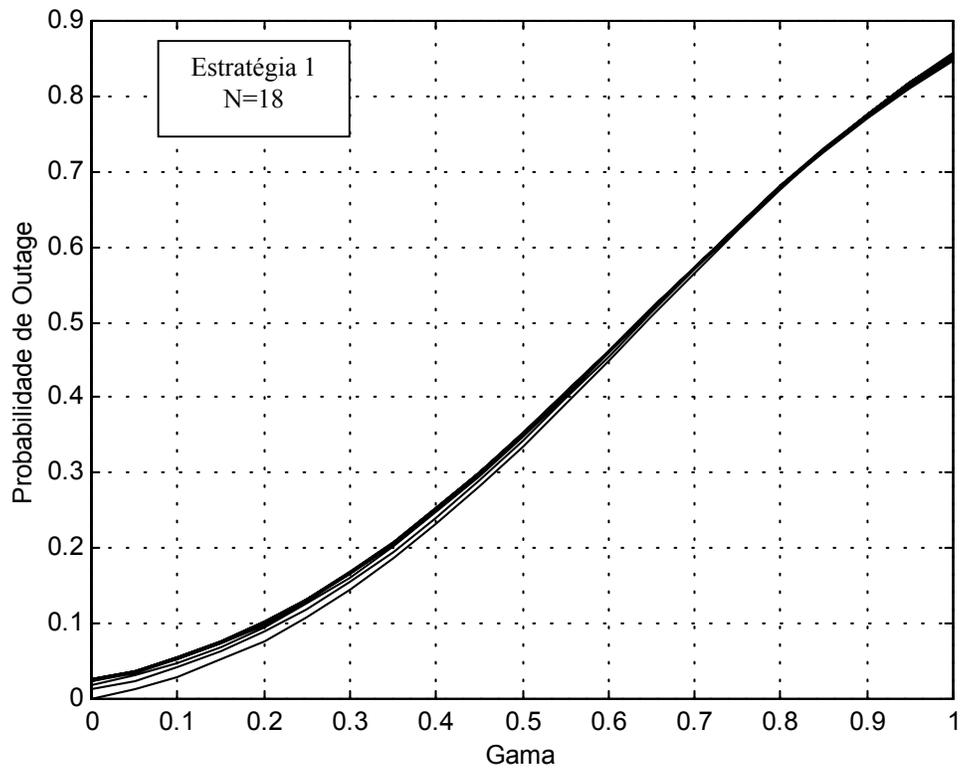


Figura 5.11 – Probabilidade de *Outage* utilizando *Binomial* – duas células – aumento de canais

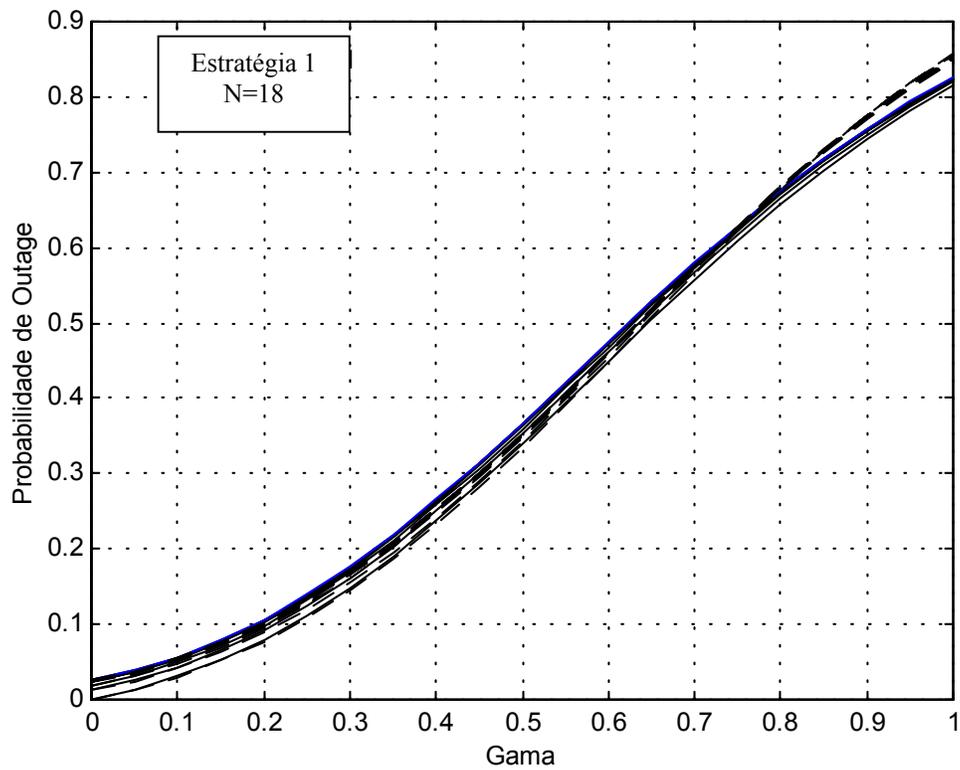


Figura 5.12 – Probabilidade de *Outage* utilizando *Erlang-B* e *Binomial* – duas células – aumento

### 5.3.2 Estratégia de Alocação 2 – Diminuição de Canais

Nesta estratégia não existe sentido calcular a probabilidade de *outage*, uma vez que não existe interferência pois o número de canais alocados na célula é de  $N_T=18$ . Somente é calculada a probabilidade de bloqueio de *soft handoff*. A Figura 5.13 mostra o resultado desta probabilidade para  $N= 18, 17, 16, 15, 14, 13$  e  $12$ .

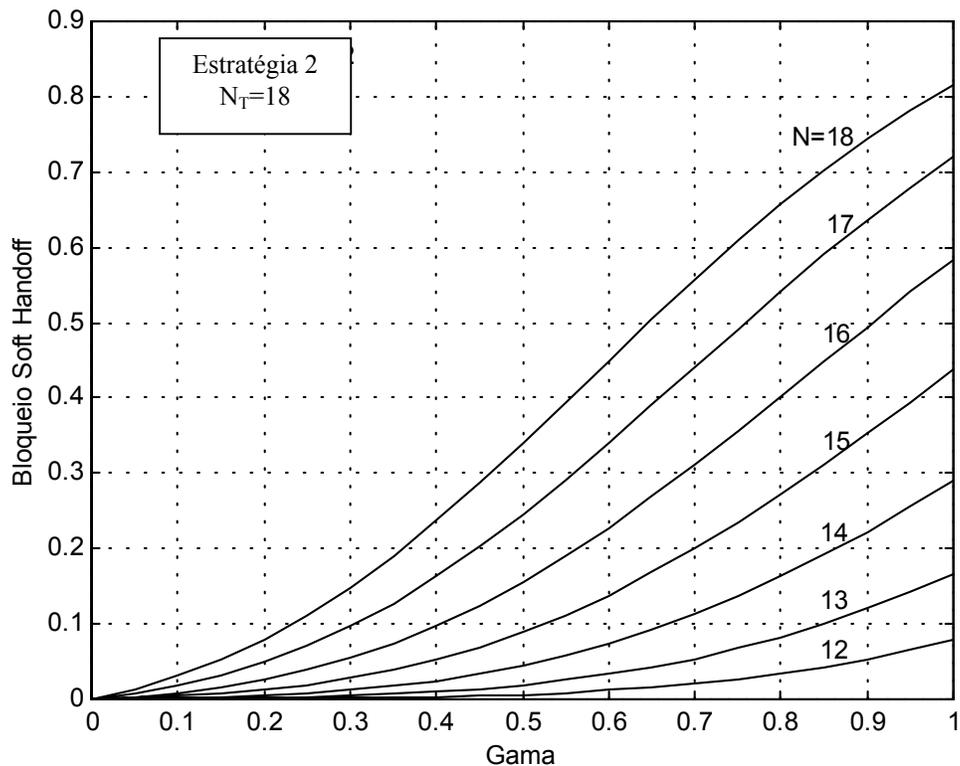


Figura 5.13 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* utilizando *Erlang-B* – duas células – diminuição de canais

Como pode ser observado pela Figura 5.13, existirá uma diminuição da probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, como era de se esperar. Porém, existirá também uma diminuição do tráfego aparente suportado pela célula. Isto significa que existirão mais canais para cursar o tráfego de *soft handoff* e menos canais para cursar o tráfego na célula. A Tabela 5.2 mostra o tráfego aparente da célula com a diminuição do número de canais alocados na célula.

Tabela 5.2

Número de Canais	Prob. Bloqueio (%)	Tráfego ( <i>Erlang-B</i> )
18	24	11,5
17	17	10,7
16	10	9,38
15	5	9,01
14	3	8,2
13	1	7,4
12	0,5	6,61

A Figura 5.14 apresenta a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* utilizando *Bernoulli* e a Figura 5.15 apresenta a comparação entre *Erlang-B* e *Bernoulli*. Pode-se observar a grande aproximação entre os resultados obtidos para *Erlang-B* e *Bernoulli*.

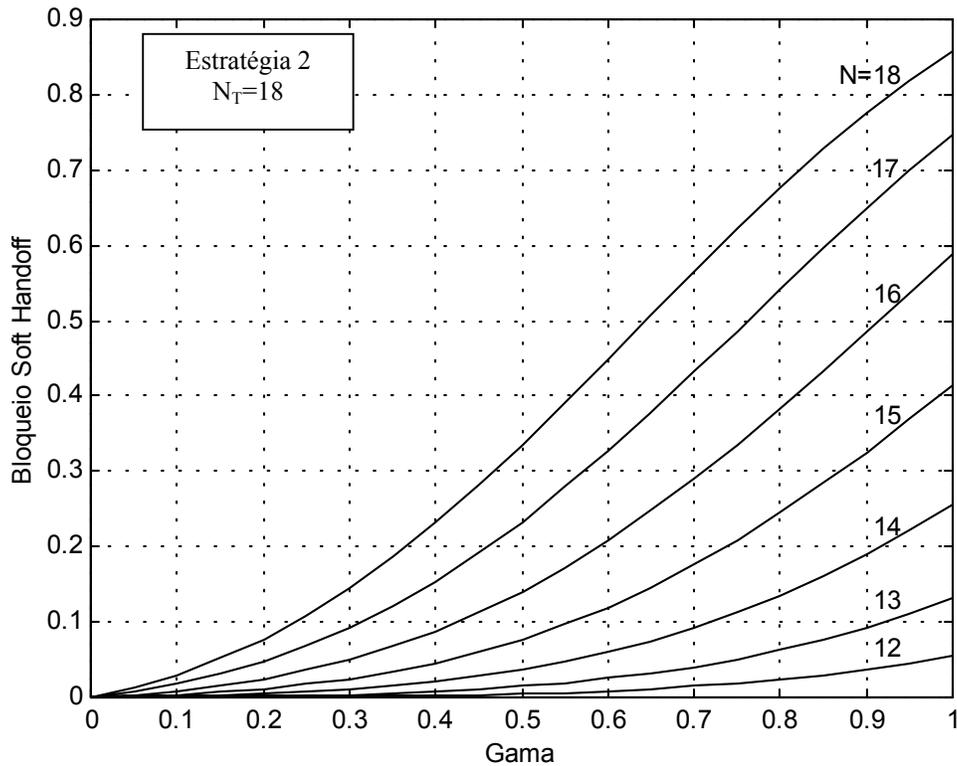


Figura 5.14 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* utilizando *Binomial* – duas células – diminuição de canais

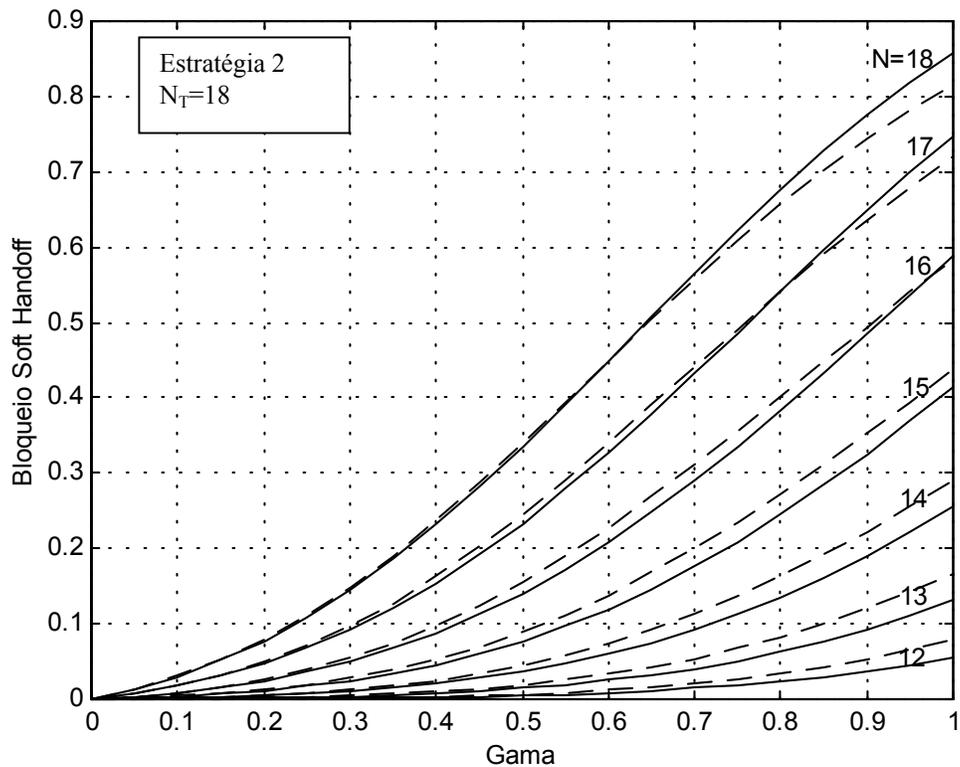


Figura 5.15 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* utilizando *Erlang-B* e *Binomial* – duas células – diminuição de canais

Verificando os resultados apresentados, onde foram feitas comparações dos resultados obtidos para *Erlang-B* e *Binomial*, fica claro que é possível a utilização de *Binomial* sem comprometimento do resultado. O ganho em termos de tempo computacional é bastante grande, o que justifica a utilização de *Binomial*. Em função disto, na estratégia apresentada a seguir, somente será utilizado *Binomial*.

### 5.3.3 Estratégia de Alocação 3 - Aumentando e Diminuindo os Canais

A próxima condição de análise será aquela em que se acrescenta canais à célula e diminui-se o número de canais internos. É importante observar que nesta estratégia existe uma diminuição do tráfego interno na célula, ou seja, uma diminuição do tráfego aparente, como observado na estratégia de alocação 2. Foram utilizados valores de  $N_T = 19, 20, 21, 22, 23$  e  $24$ . Para cada valor de  $N_T$  variou-se o número de canais internos de  $N_{INT} = 18, 17, 16, 15, 14, 13$  e  $12$ . Para cada valor de  $N_T$ , são apresentadas as probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage*.

**Para  $N_T=19$**

As Figuras 5.16, 5.17 e 5.18 apresentam as probabilidades de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage*, respectivamente.

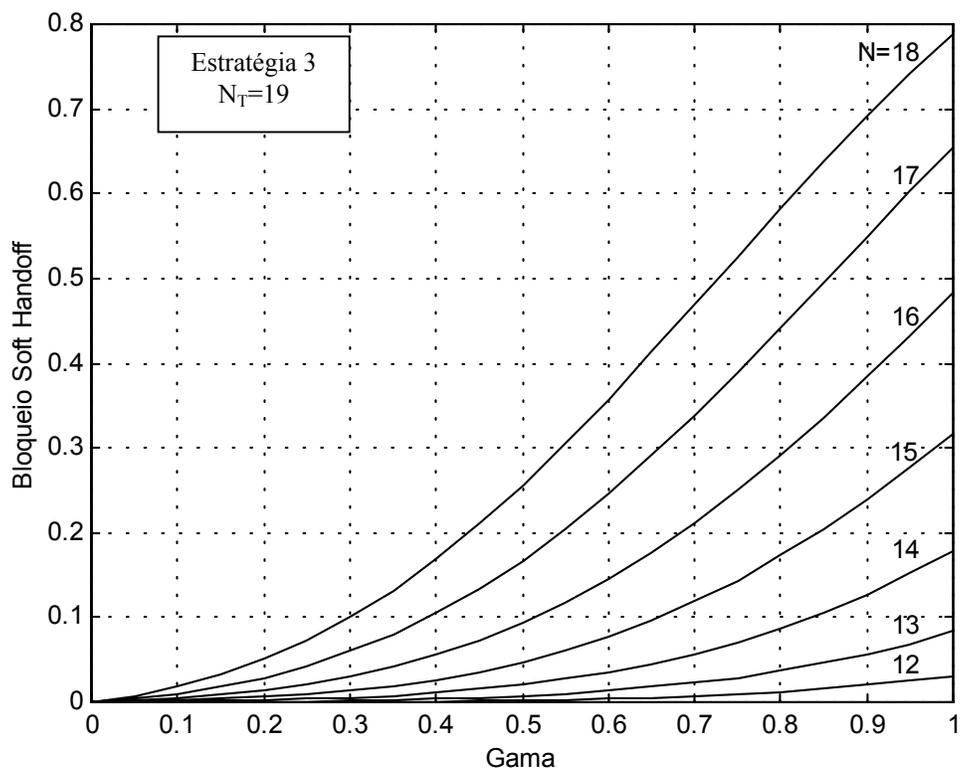


Figura 5.16 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* – duas células – aumentando e diminuindo canais

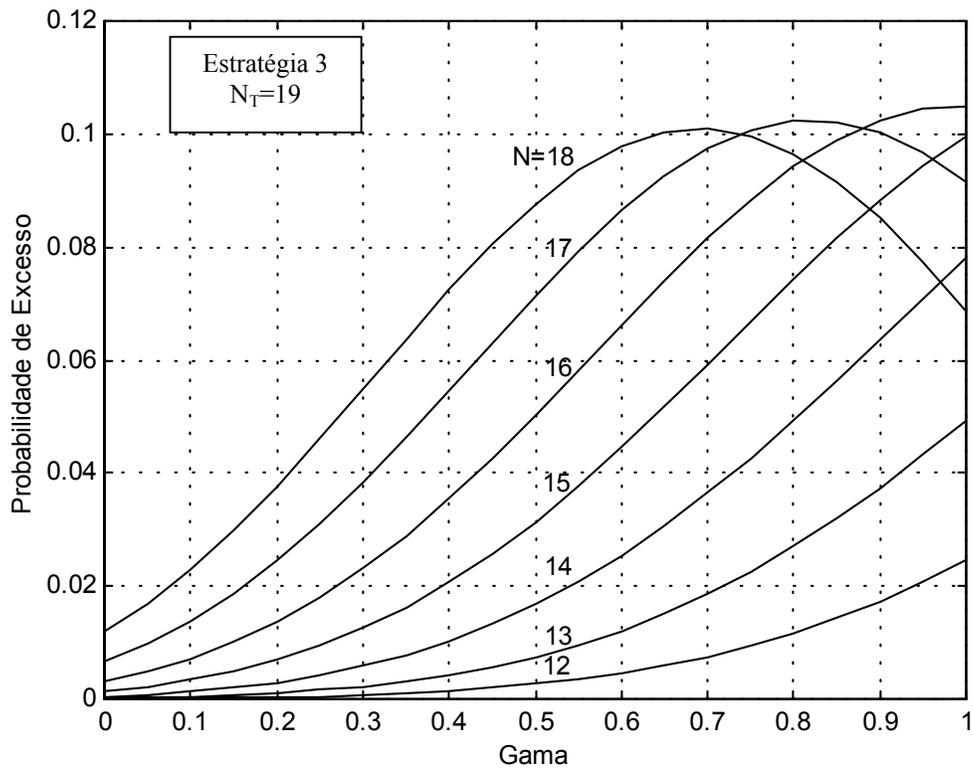


Figura 5.17 – Probabilidade de Excesso – duas células – aumentando e diminuindo canais

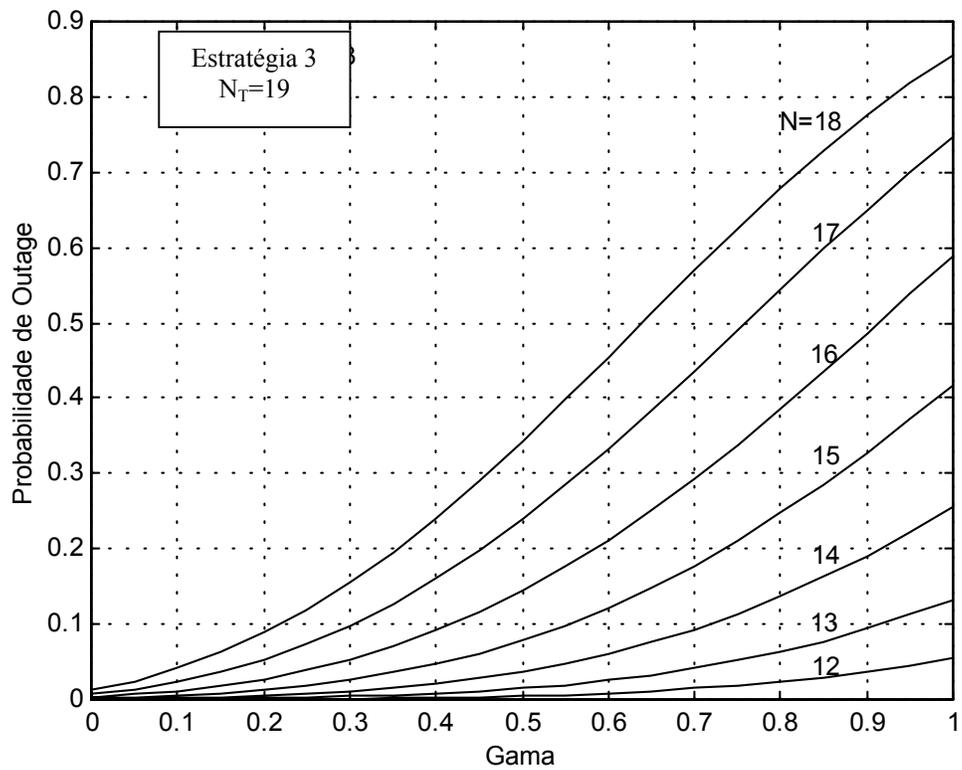


Figura 5.18 – Probabilidade de *Outage* – duas células – aumentando e diminuindo canais

**Para  $N_T=20$**

As Figuras 5.19, 5.20 e 5.21 apresentam as probabilidades de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage*, respectivamente.

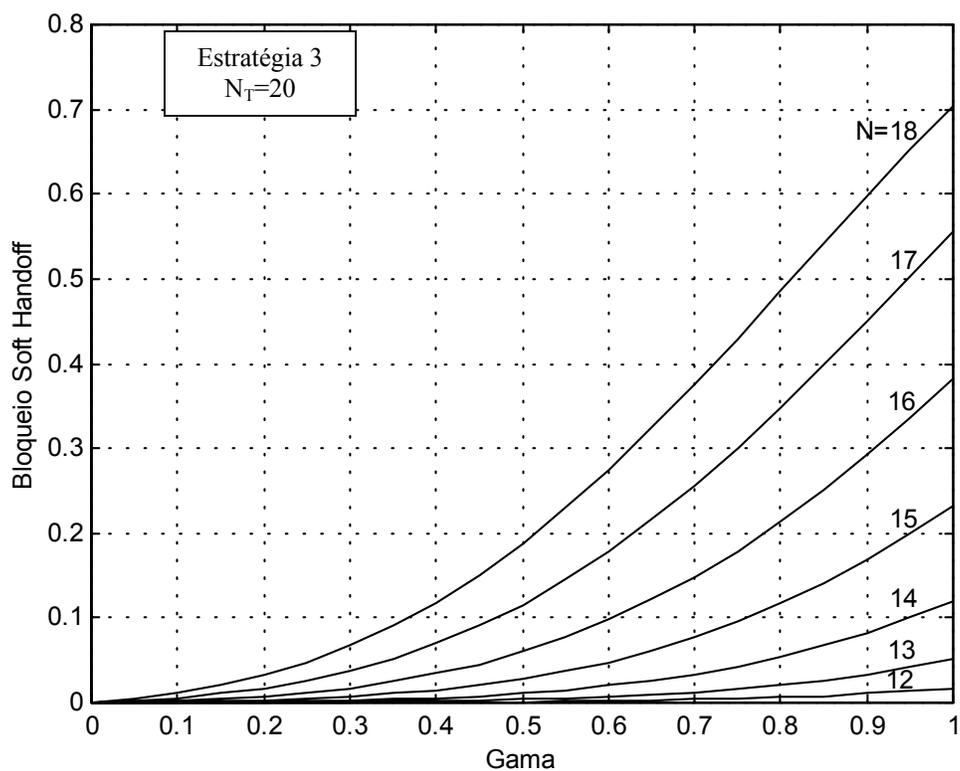


Figura 5.19 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* – duas células – aumentando e diminuindo canais

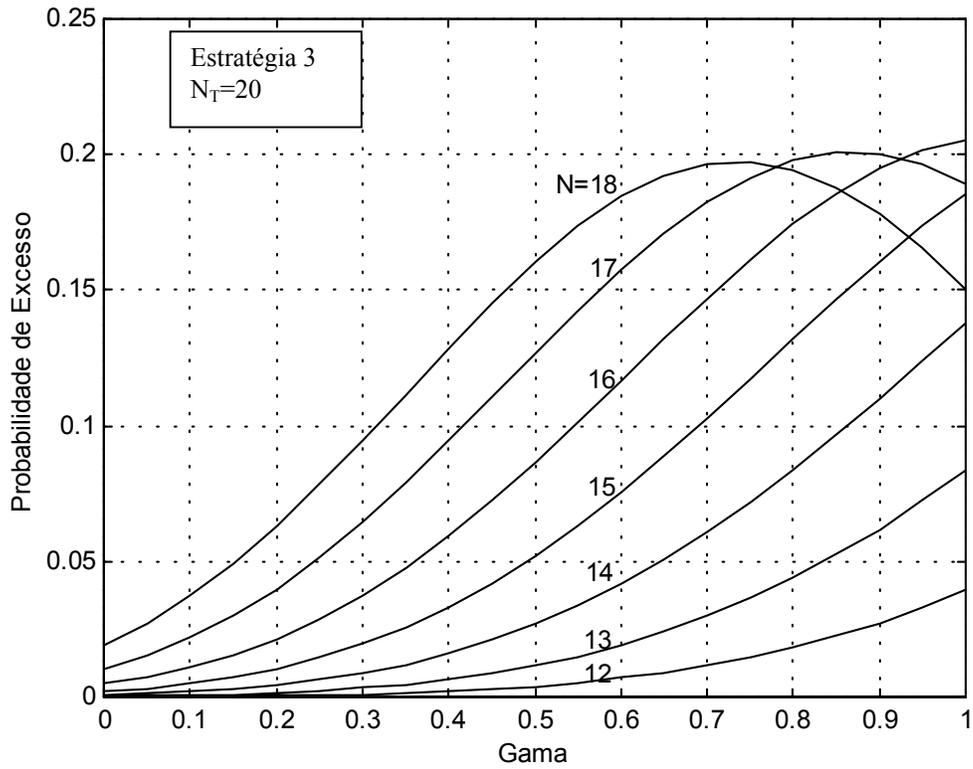


Figura 5.20 – Probabilidade de Excesso – duas células – aumentando e diminuindo canais

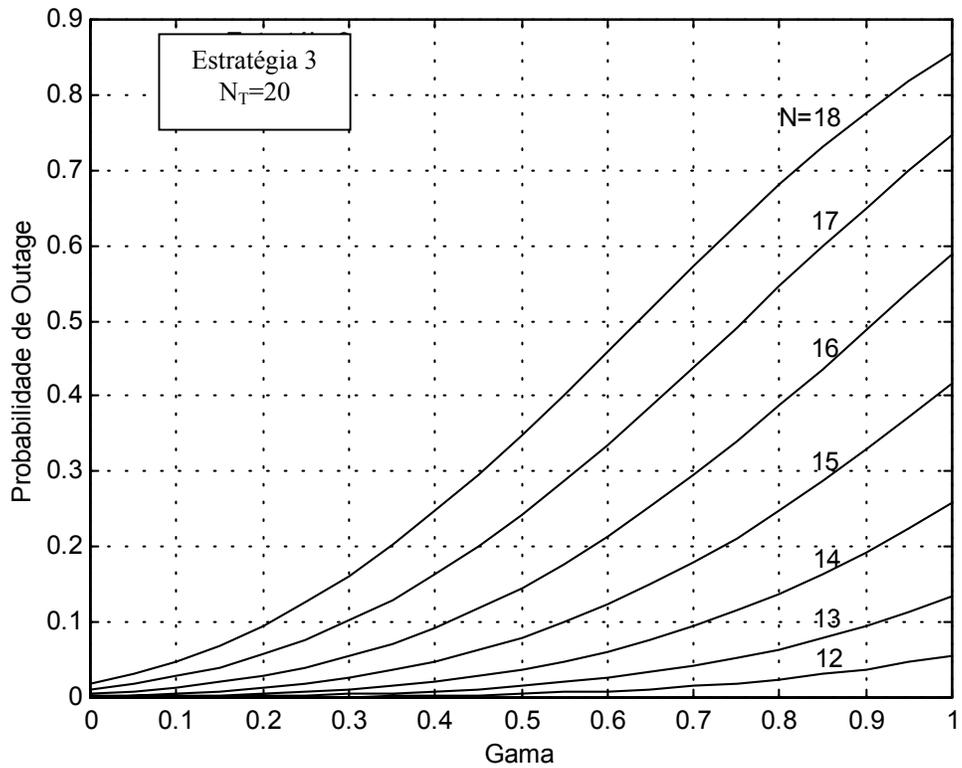


Figura 5.21 – Probabilidade de *Outage* – duas células – aumentando e diminuindo canais

**Para  $N_T=21$**

As Figuras 5.22, 5.23 e 5.24 apresentam as probabilidades de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage*, respectivamente.

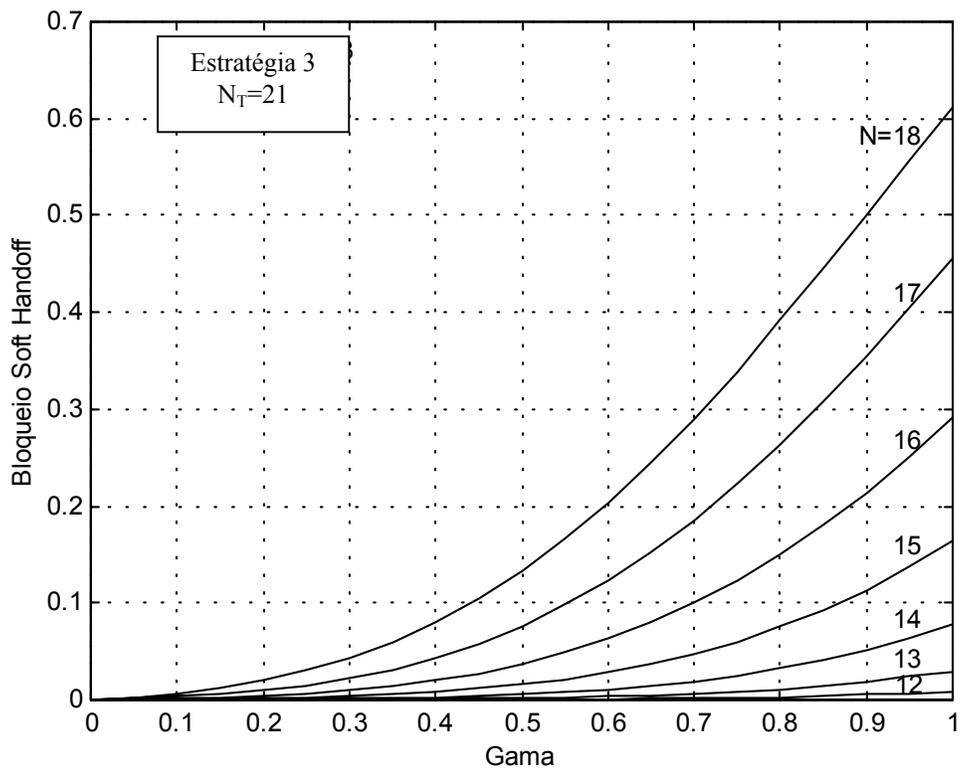


Figura 5.22 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* – duas células – aumentando e diminuindo canais

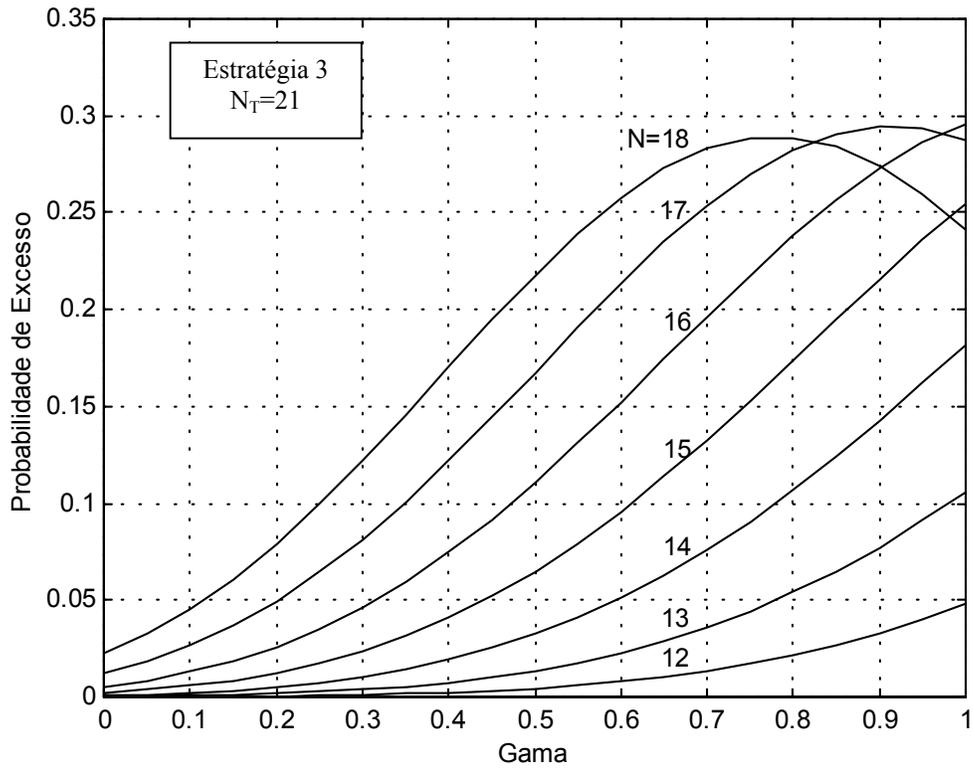


Figura 5.23 – Probabilidade de Excesso – duas células – aumentando e diminuindo canais

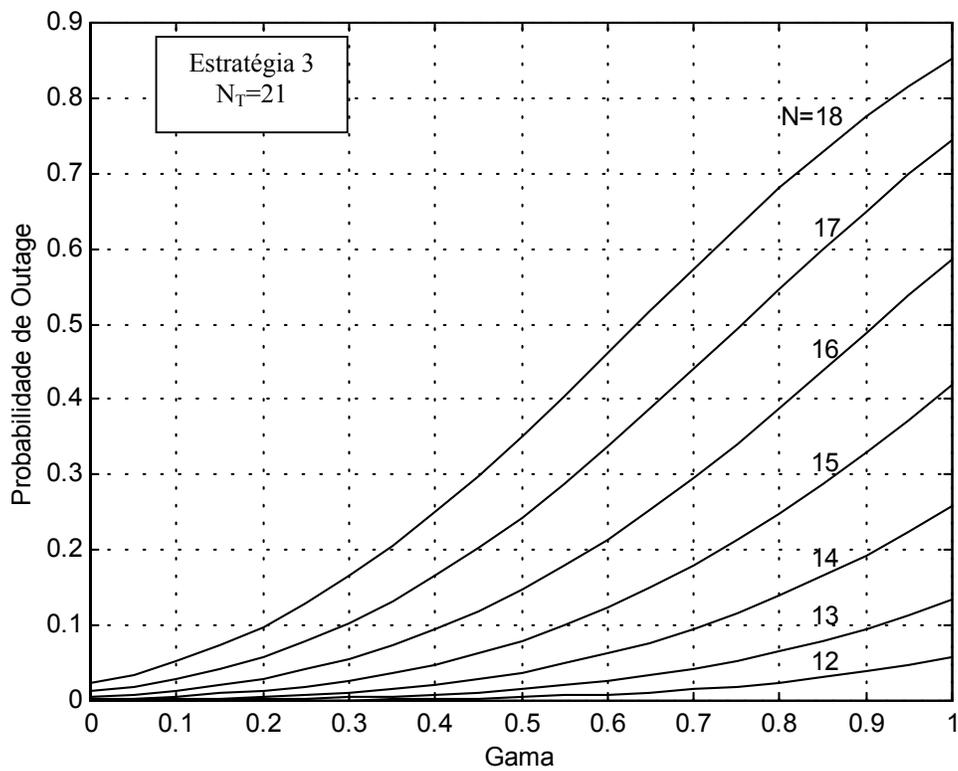


Figura 5.24 – Probabilidade de *Outage* – duas células – aumentando e diminuindo canais

**Para  $N_T=22$**

As Figuras 5.25, 5.26 e 5.27 apresentam as probabilidades de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage*, respectivamente.

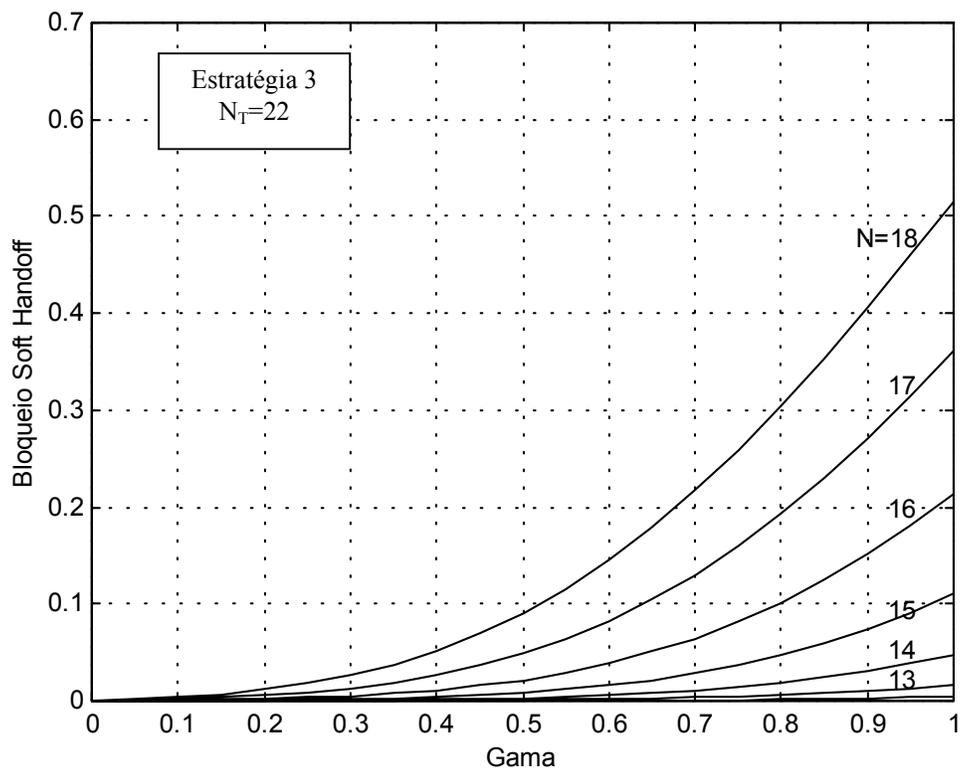


Figura 5.25 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* – duas células – aumentando e diminuindo canais

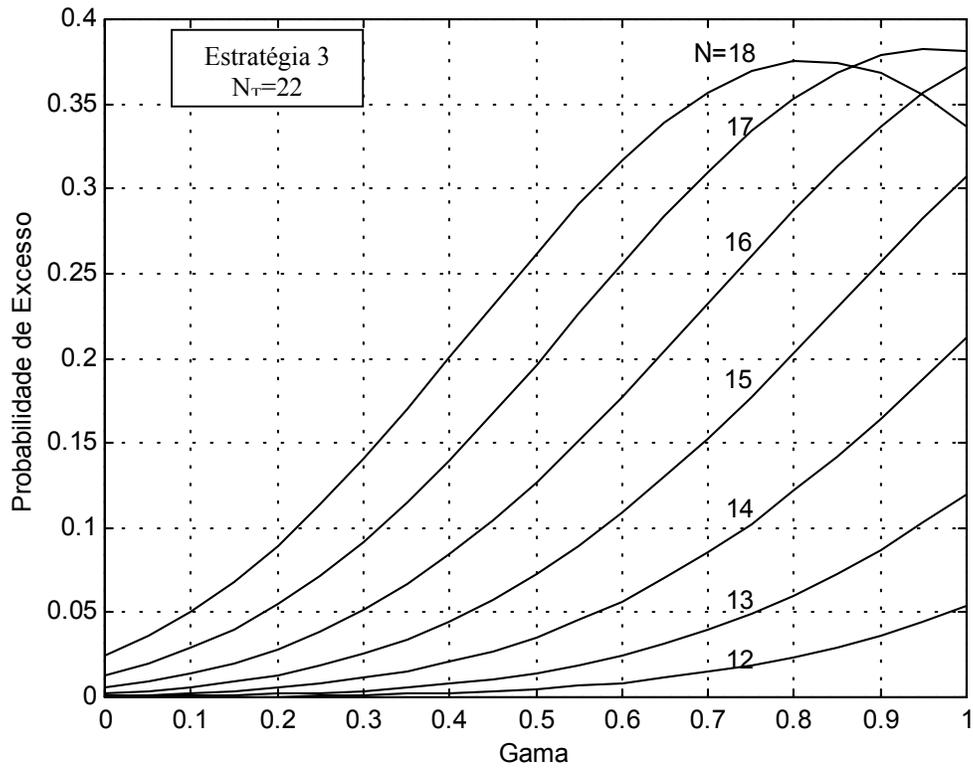


Figura 5.26 – Probabilidade de Excesso – duas células – aumentando e diminuindo canais

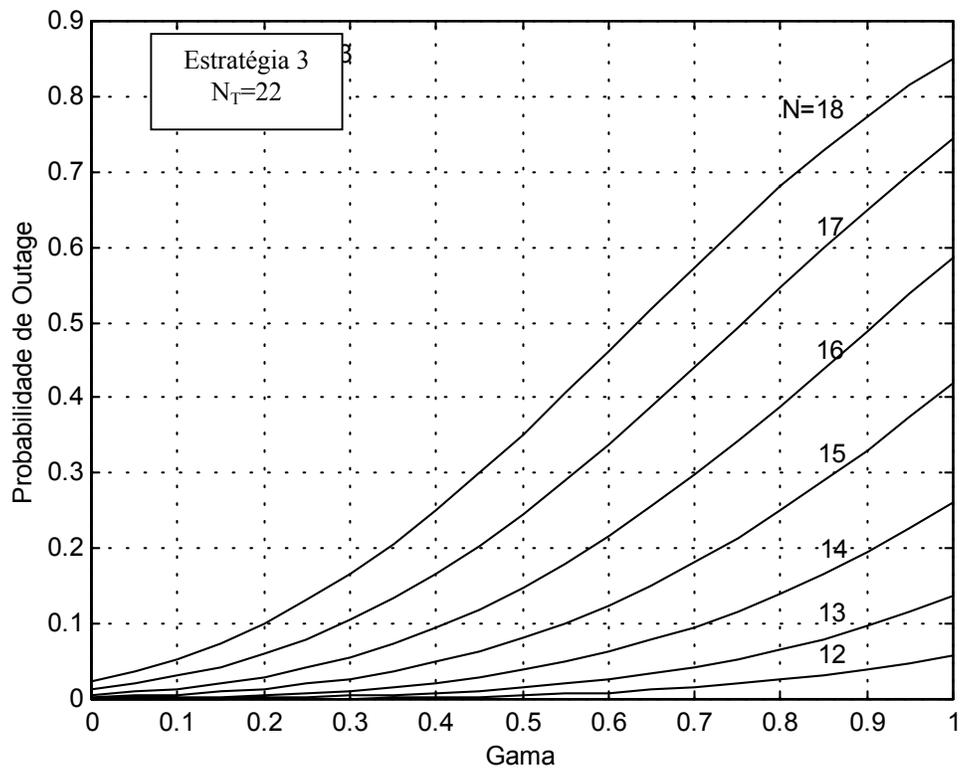


Figura 5.27 – Probabilidade de *Outage* – duas células – aumentando e diminuindo canais

**Para  $N_T=23$**

As Figuras 5.28, 5.29 e 5.30 apresentam as probabilidades de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage*, respectivamente.

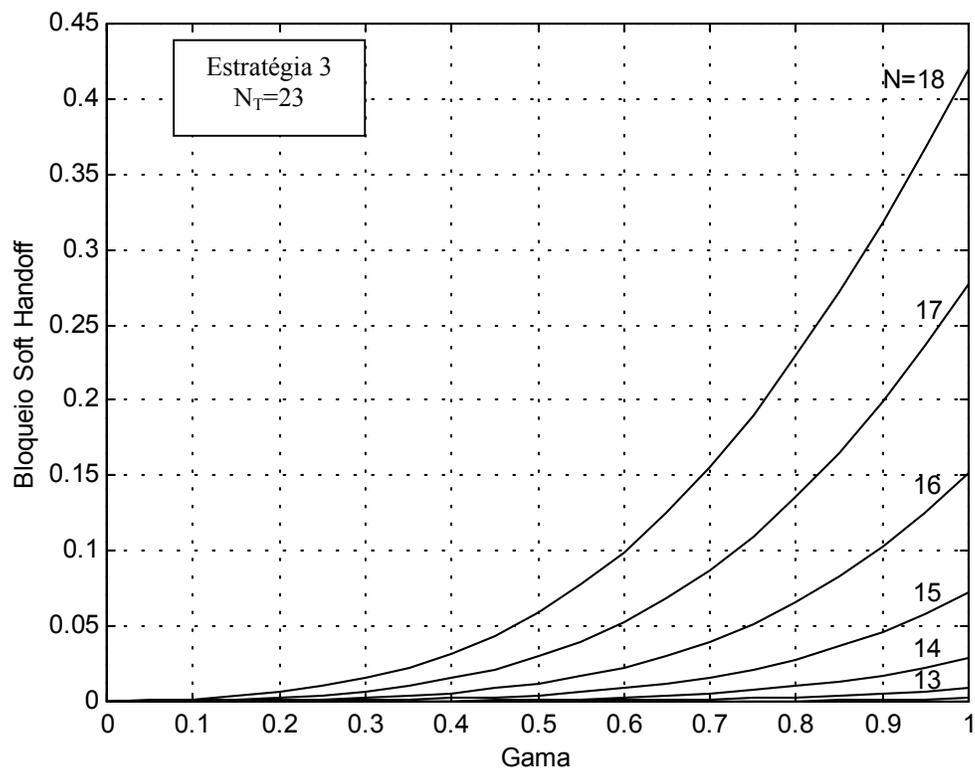


Figura 5.28 – Probabilidade de *Soft handoff* – duas células – aumentando e diminuindo canais

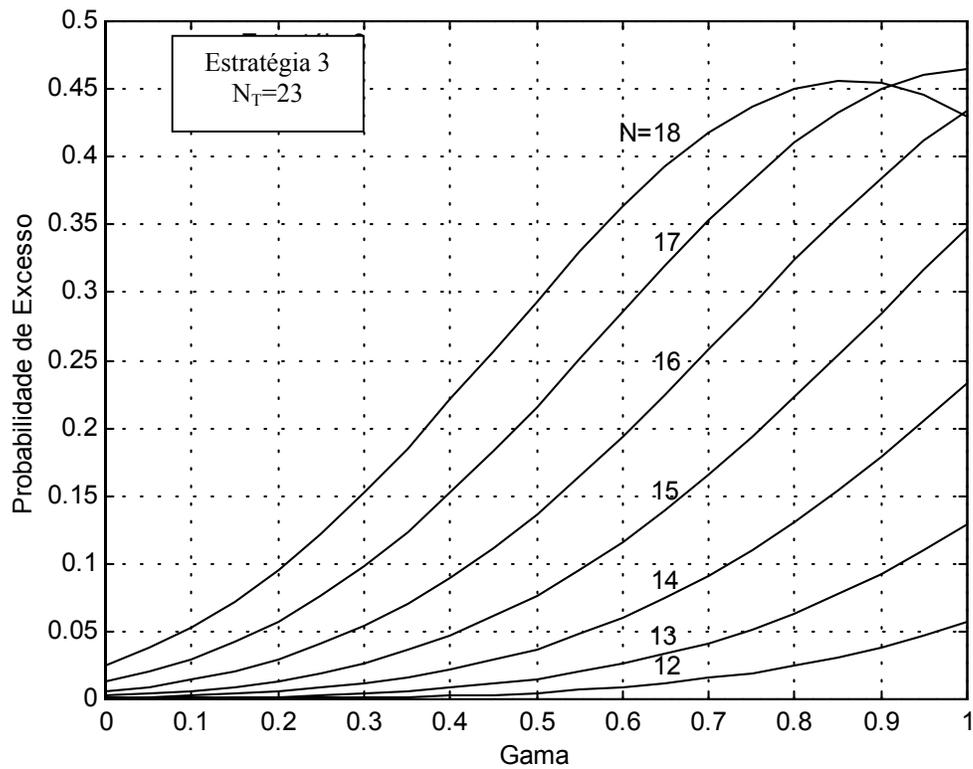


Figura 5.29 – Probabilidade de Excesso – duas células – aumentando e diminuindo canais

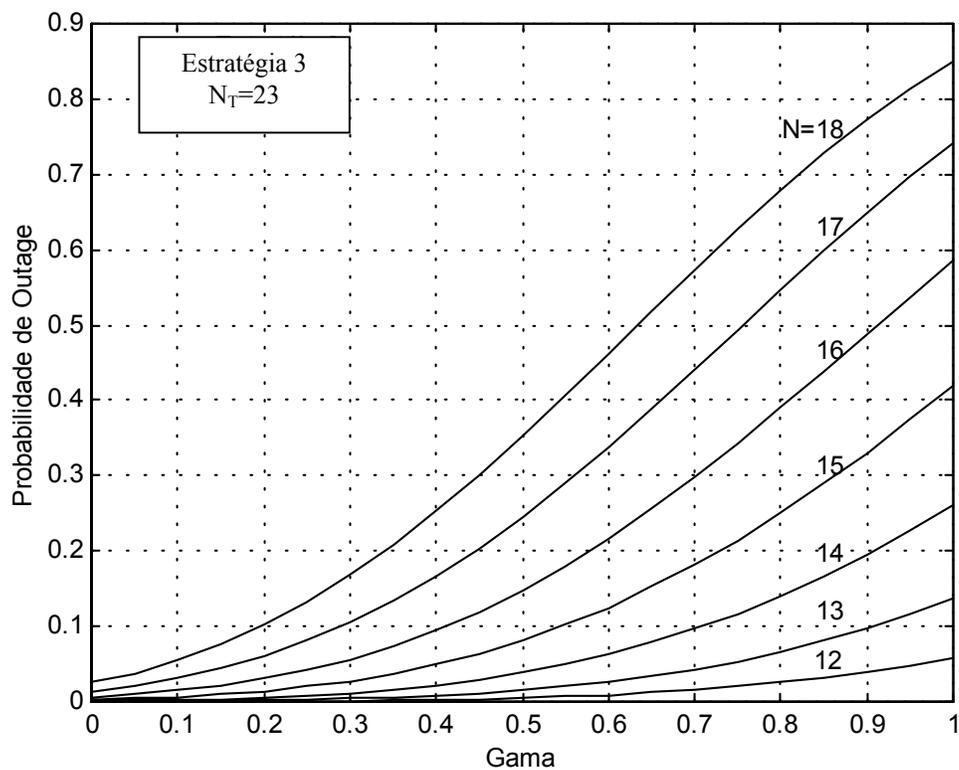


Figura 5.30 – Probabilidade de *Outage* – duas células – aumentando e diminuindo canais

**Para  $N_T=24$**

As Figuras 5.31, 5.32 e 5.33 apresentam as probabilidades de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage*, respectivamente.

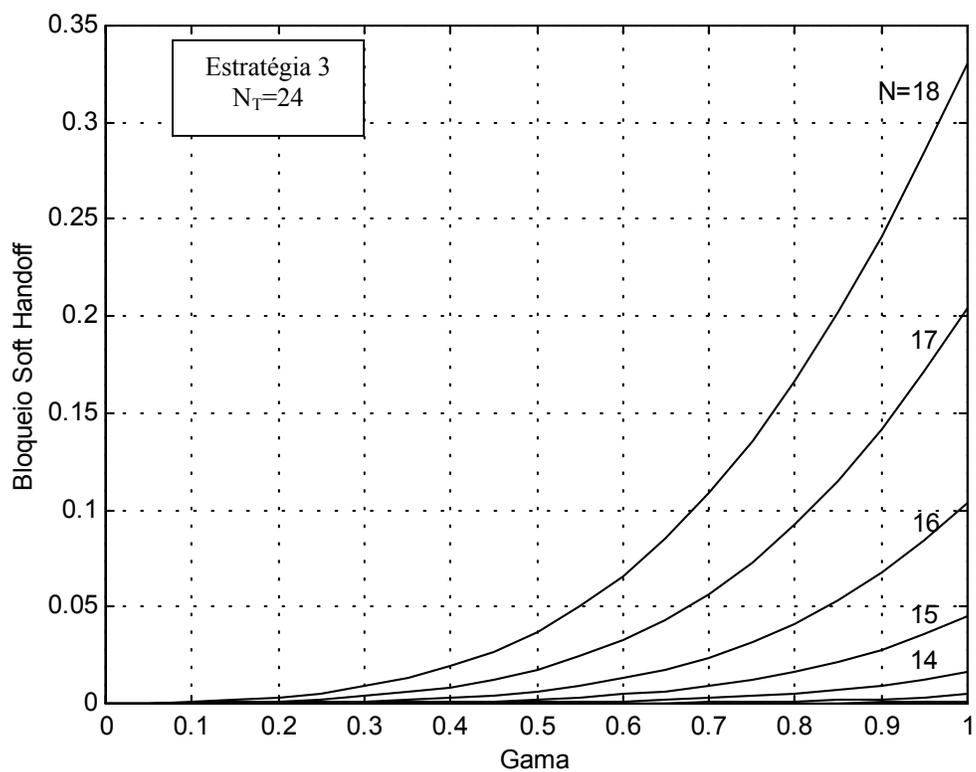


Figura 5.31 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* – duas células – aumentando e diminuindo canais

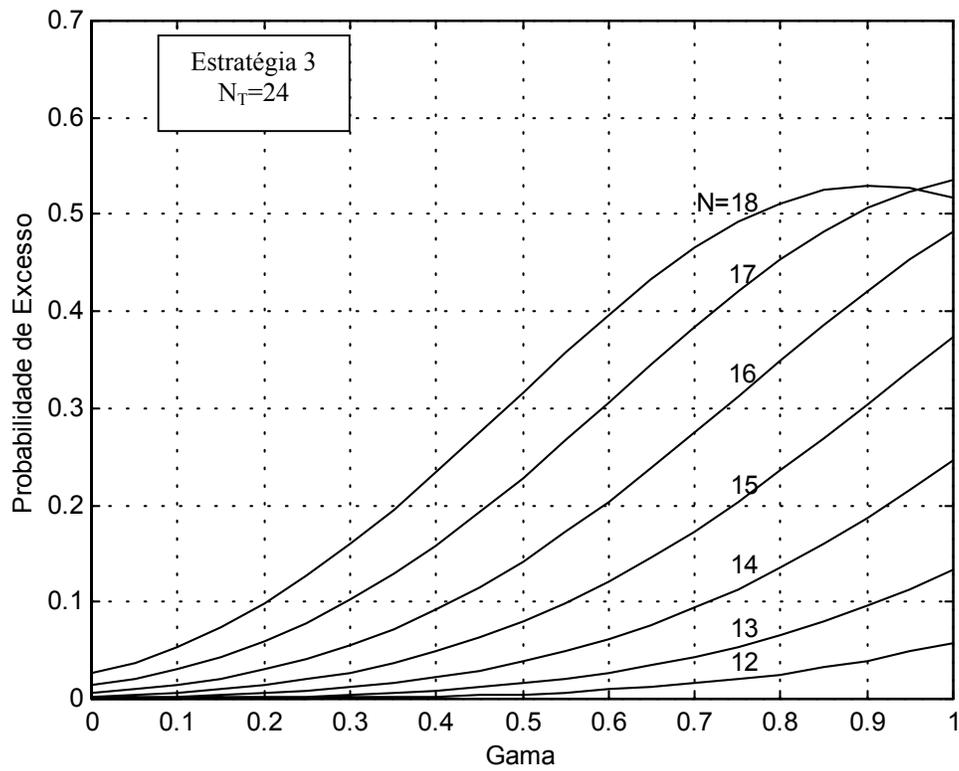


Figura 5.32 - Probabilidade de Excesso – duas células – aumentando e diminuindo canais

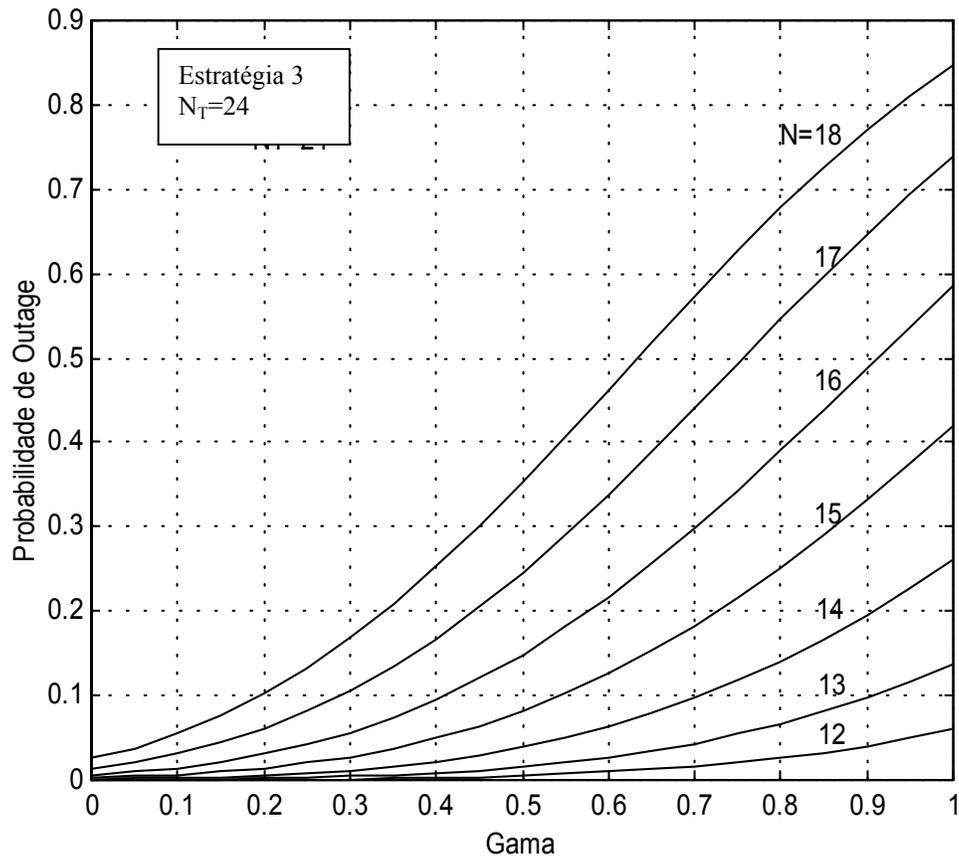


Figura 5.33 – Probabilidade de *Outage* – duas células – aumentando e diminuindo canais

#### **5.4 Resultados para Três Células**

Neste item serão utilizadas, para o caso de três células, as estratégias de alocação apresentadas no item 5.2. Para a avaliação das probabilidades na estratégia de alocação 1, serão utilizadas as distribuições de *Erlang-B* e *Bernoulli*, para descrever o comportamento do tráfego nas células vizinhas. Será feita uma comparação dos resultados obtidos para cada uma das distribuições, demonstrando a proximidade dos resultados. Esta aproximação é melhor para valores de sobreposição menores que 50%. Para as outras estratégias somente será utilizada a distribuição *Binomial* para descrever o comportamento do tráfego na célula vizinha.

A condição nominal em relação a qual foram gerados os resultados para 2 células é a seguinte:

$N=18$  canais,

$B=2\%$  e

$A=11,5$  Erlangs.

Como mencionado anteriormente, esta é a condição onde a interferência provocada pelos usuários pode ser desprezada. A seguir são obtidos os resultados para cada uma das estratégias mostradas no item 5.2.

##### **5.4.1 Estratégia de Alocação 1 - Aumento de Canais**

Para esta estratégia, serão avaliadas as probabilidades de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage*. O número total de canais alocados na célula alvo será de  $N_T=19, 20, 21, 22, 23$  e  $24$ . As probabilidades são obtidas em função da área da região de sobreposição, que é variada de 0 a 100%. A seguir são obtidos os resultados para a probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* e probabilidade de *Outage*.

### Bloqueio de *Soft handoff*

A Figura 5.34 apresenta o comportamento da probabilidade de bloqueio de *soft handoff* utilizando distribuição de *Erlang-B*.

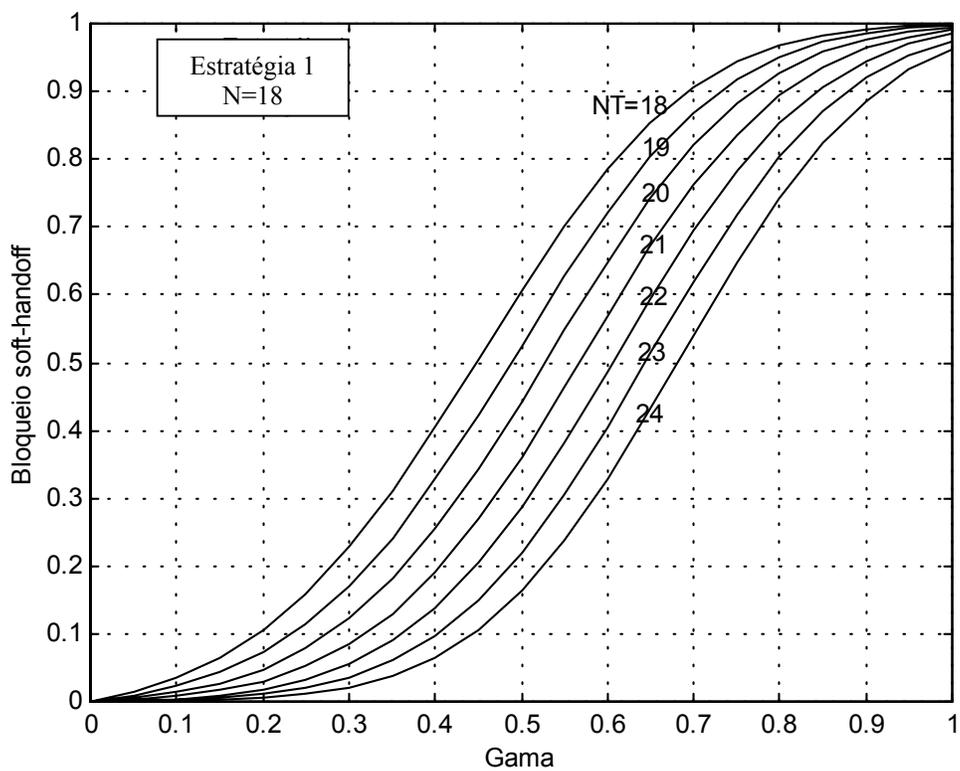


Figura 5.34 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* utilizando *Erlang-B* – três células – aumento de canais

Analisando o comportamento da probabilidade de bloqueio de *soft handoff* é possível observar, como era de se esperar, que à medida em que a região de sobreposição aumenta, também aumenta a probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, para um certo número de canais alocados. Sem área de sobreposição entre as células, ou seja, para  $\gamma=0$ , a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* é igual a zero. Este resultado é coerente, uma vez que não existe probabilidade de canais ativos na região de sobreposição, quando esta não existe. Quando são acrescentados canais aos nominais, a probabilidade de bloqueio de *soft*

*handoff* sofre também uma redução. Para  $\gamma=0,4$ , a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* para os vários  $N_T$  está mostrado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3

$N_T$	Prob. Bloqueio de <i>Soft handoff</i> (%)
18	40
19	33
20	27
21	20
22	14
23	10
24	7

Os resultados mostram que, para uma certa área de sobreposição, à medida em que se aumenta o número de canais totais diminuirá o bloqueio de *soft handoff*, como era de se esperar. Por outro lado, para um certo número de canais  $N_T$  fixo, à medida que aumenta a área de sobreposição  $\gamma$ , o bloqueio aumentará uma vez que, quanto maior a área de sobreposição, maior a probabilidade de existirem canais ativos na área de sobreposição.

A Figura 5.35 apresenta a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* utilizando *Bernoulli* para descrever o comportamento do tráfego nas células vizinhas.

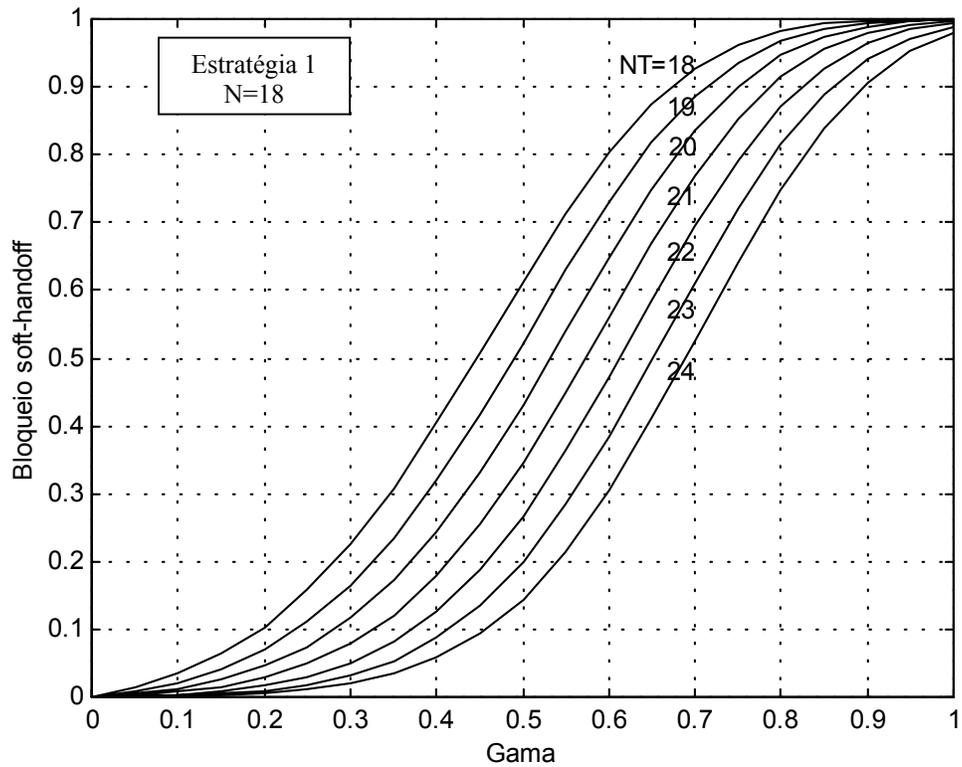


Figura 5.35 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* utilizando *Binomial* – três células – aumento de canais

A Figura 5.36 apresenta uma comparação entre os dois resultados obtidos para a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* utilizando as distribuições de *Erlang-B* e *Bernoulli*.

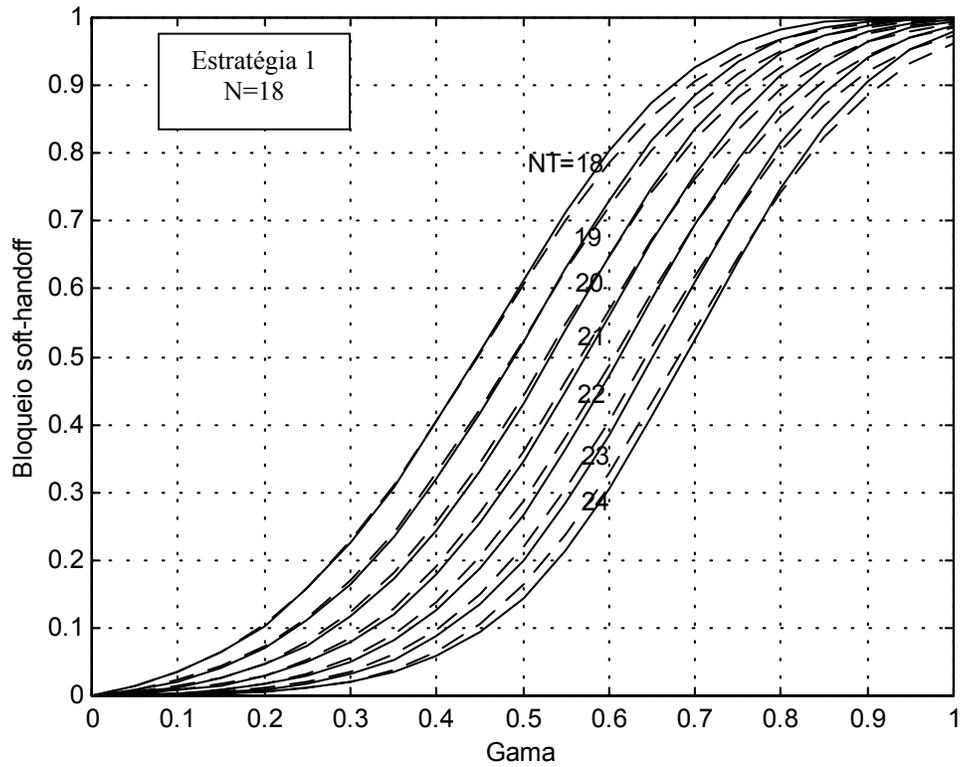


Figura 5.36 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* comparando *Erlang-B* e *Binomial* – três células – aumento de canais

Como pode ser observado pela Figura 5.36, os resultados são muito próximos. Esta aproximação é maior para valores de  $\gamma$  abaixo de 50%, que é mais freqüente em sistemas celulares.

## Probabilidade de Excesso

A probabilidade de excesso está mostrada na Figura 5.37.

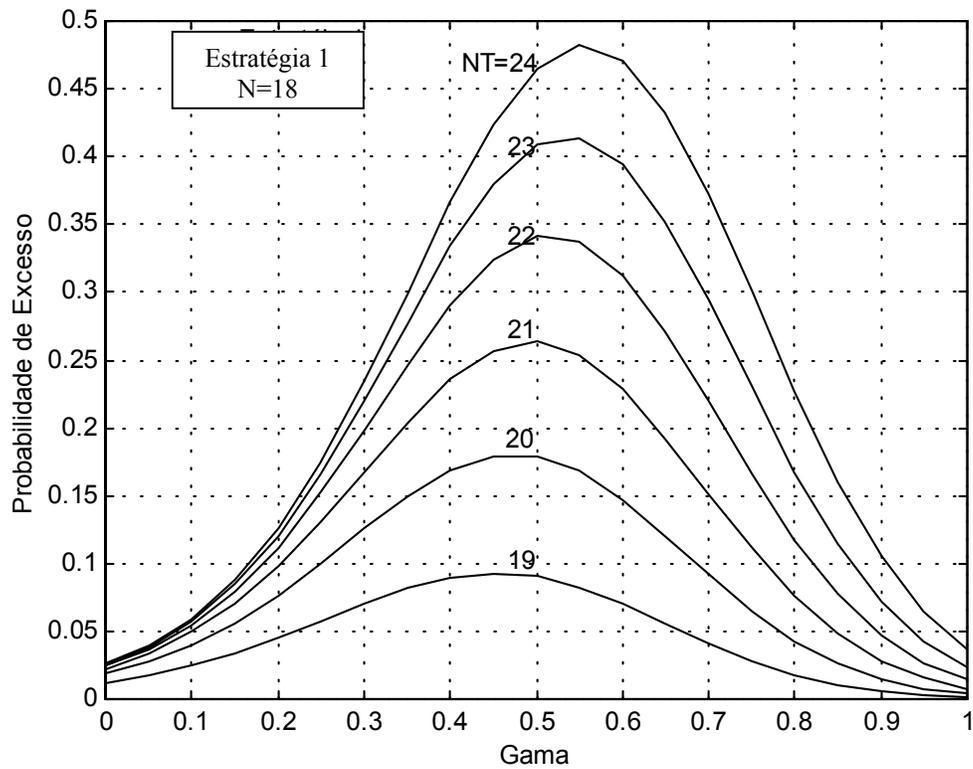


Figura 5.37 – Probabilidade de Excesso utilizando *Erlang-B* – três células – aumento de canais

As mesmas observações feitas para o caso de duas células são válidas para o caso de três células.

A Figura 5.38 apresenta a probabilidade de excesso utilizando *Bernoulli*.

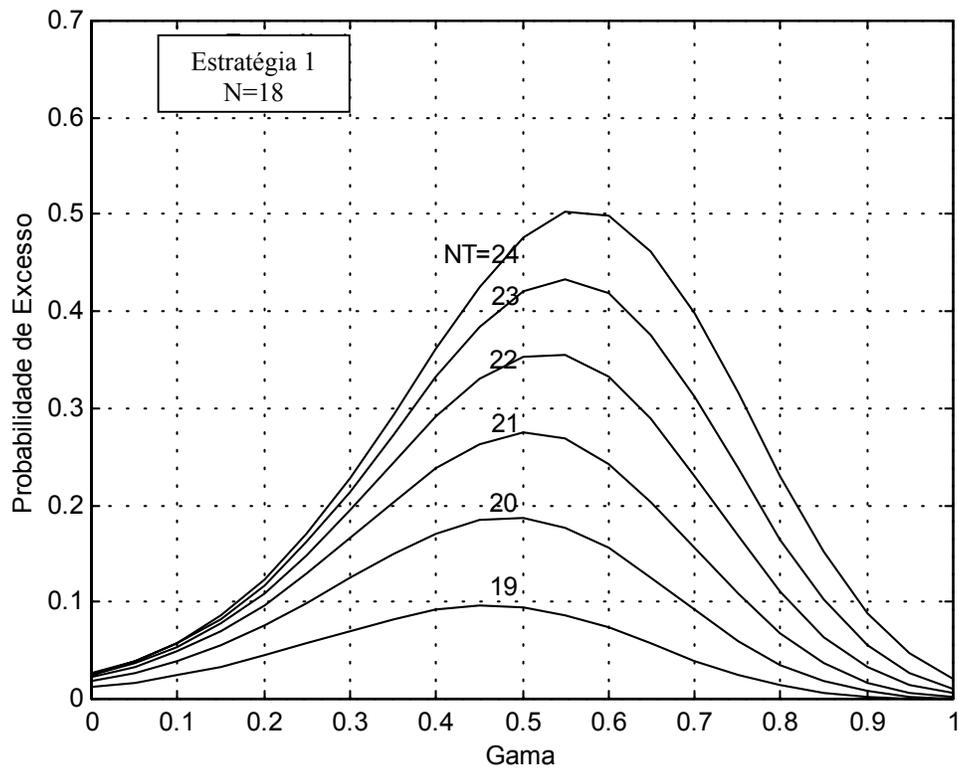


Figura 5.38 – Probabilidade de Excesso utilizando *Binomial* – três células – aumento de canais

A Figura 5.39 apresenta a comparação da probabilidade de excesso utilizando *Erlang-B* e *Bernoulli*.

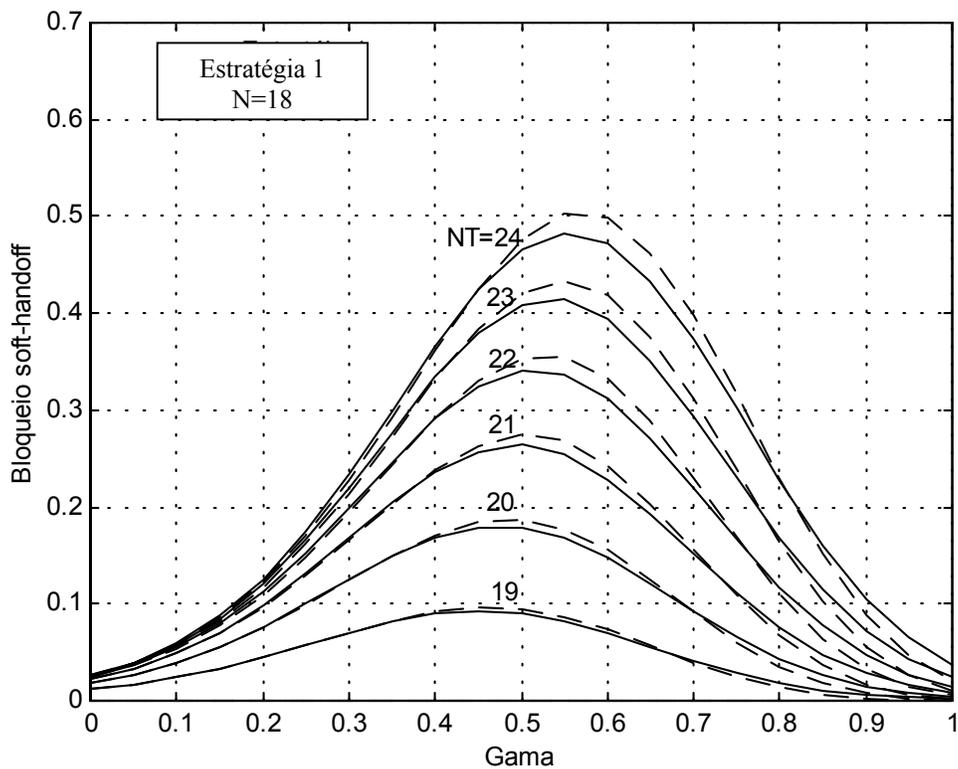


Figura 5.39 – Probabilidade de Excesso utilizando *Erlang-B* e *Bernoulli* – três células – aumento de canais

Também, para a probabilidade de excesso, a aproximação entre *Erlang-B* e *Bernoulli* é bastante grande.

### Probabilidade de Outage

A probabilidade de *outage* está apresentada na Figura 5.40.

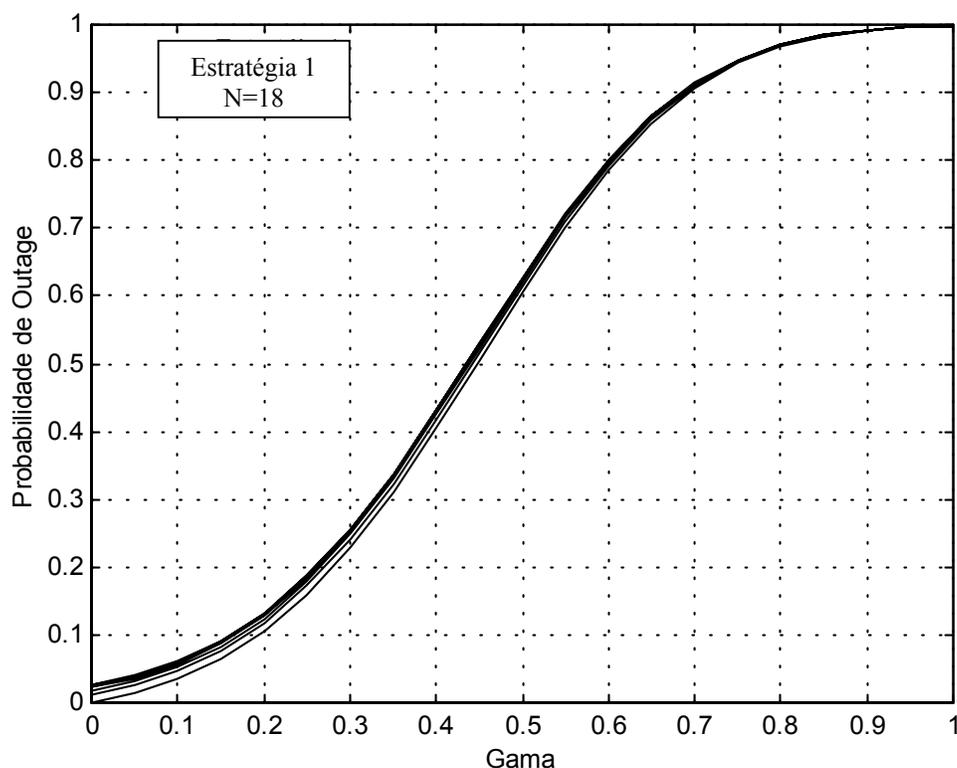


Figura 5.40 – Probabilidade de *Outage* utilizando *Erlang-B* – três células – aumento de canais

Semelhantemente ao caso de duas células, para o caso de três células, pode-se verificar que não existe diferença significativa da probabilidade de *outage* com o aumento do número de canais alocados na célula. Este resultado é interessante, uma vez que mostra que, para esta estratégia, a probabilidade de *outage* é a mesma, independente do número de canais alocados na célula. Este fato pode ser explicado, pois à medida em que são acrescentados canais, existem uma diminuição da probabilidade de bloqueio de *soft handoff* e um aumento da probabilidade de excesso, como pode ser verificado nas Figuras 5.34 e 5.37, sendo a probabilidade de *outage* a soma destas duas probabilidades.

A Figura 5.41 apresenta a probabilidade de *outage* utilizando *Bernoulli*.

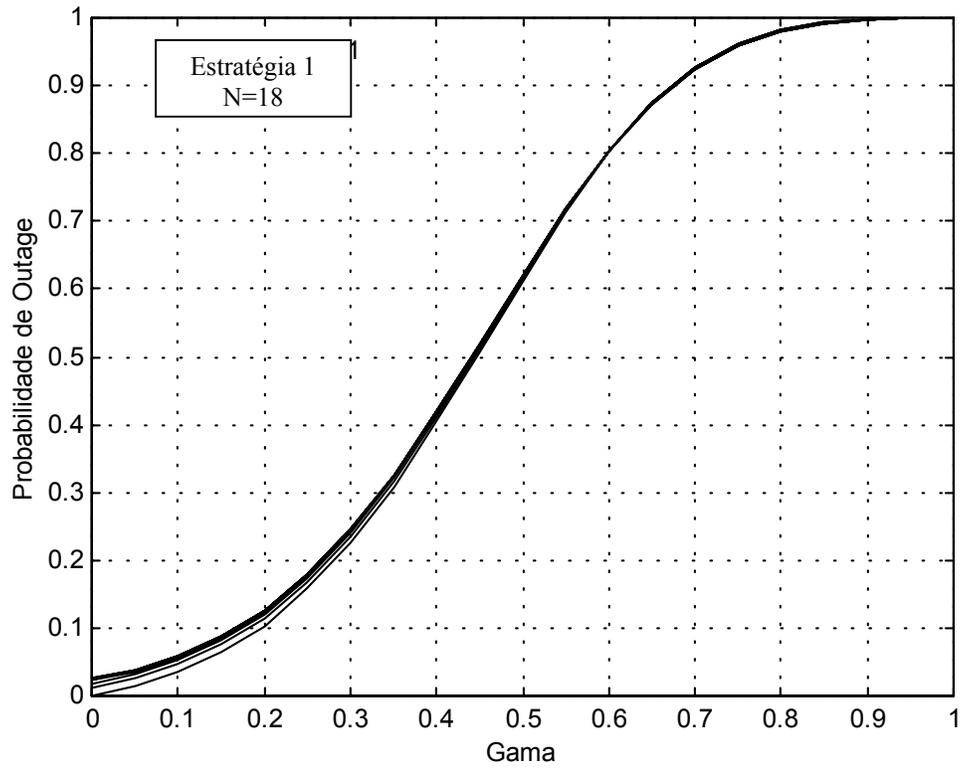


Figura 5.41 – Probabilidade de *Outage* utilizando *Binomial* – tr\u00eas c\u00e9lulas – aumento de canais

A Figura 5.42 apresenta a compara\u00e7\u00e3o da probabilidade de *outage* utilizando *Erlang-B* e *Bernoulli*.

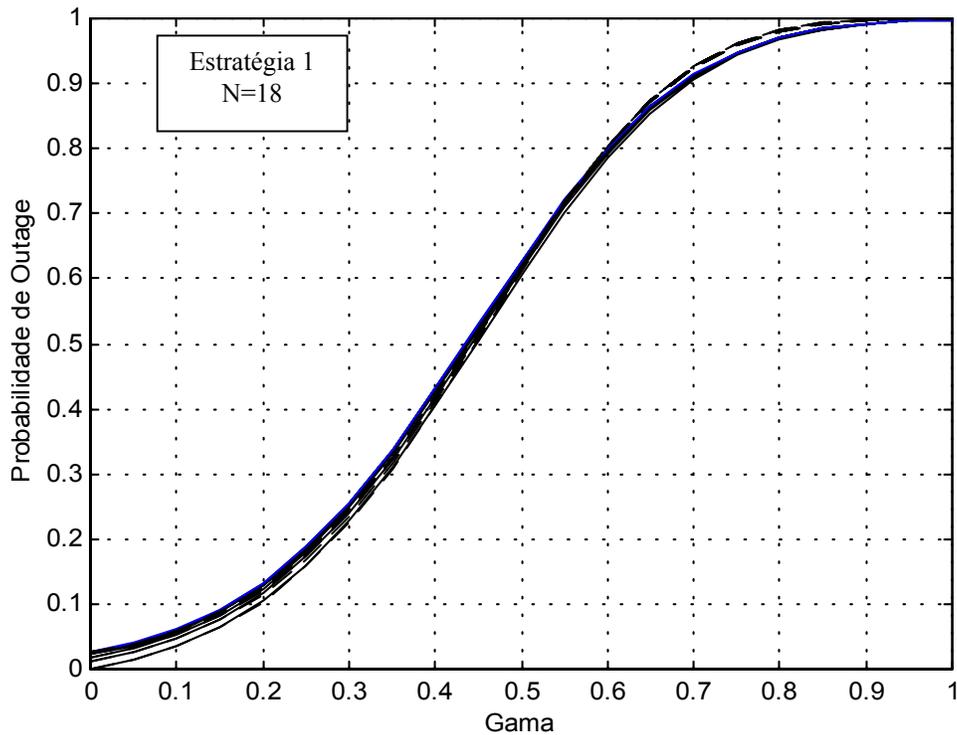


Figura 5.42 – Probabilidade de *Outage* utilizando *Erlang-B* e *Binomial* – tr\u00eas c\u00e9lulas – aumento de canais

Observar que, para tr\u00eas c\u00e9lulas, a aproxima\u00e7\u00e3o da probabilidade de *outage* utilizando *Erlang-B* e *Binomial* \u00e9 ainda maior, o que demonstra a viabilidade da utiliza\u00e7\u00e3o da distribui\u00e7\u00e3o *Binomial* para representar o tr\u00e1fego das c\u00e9lulas vizinhas.

#### 5.4.2 Estrat\u00e9gia de Aloca\u00e7\u00e3o 2 – Diminui\u00e7\u00e3o de Canais

Nesta estrat\u00e9gia n\u00e3o existe sentido calcular a probabilidade de *outage*, uma vez que n\u00e3o existe interfer\u00eancia pois o n\u00famero de canais alocados na c\u00e9lula \u00e9 de  $N_T=18$ . Somente \u00e9 calculada a probabilidade de bloqueio de *soft handoff*. A Figura 5.43 mostra o resultado desta probabilidade para  $N= 18, 17, 16, 15, 14, 13$  e  $12$ .

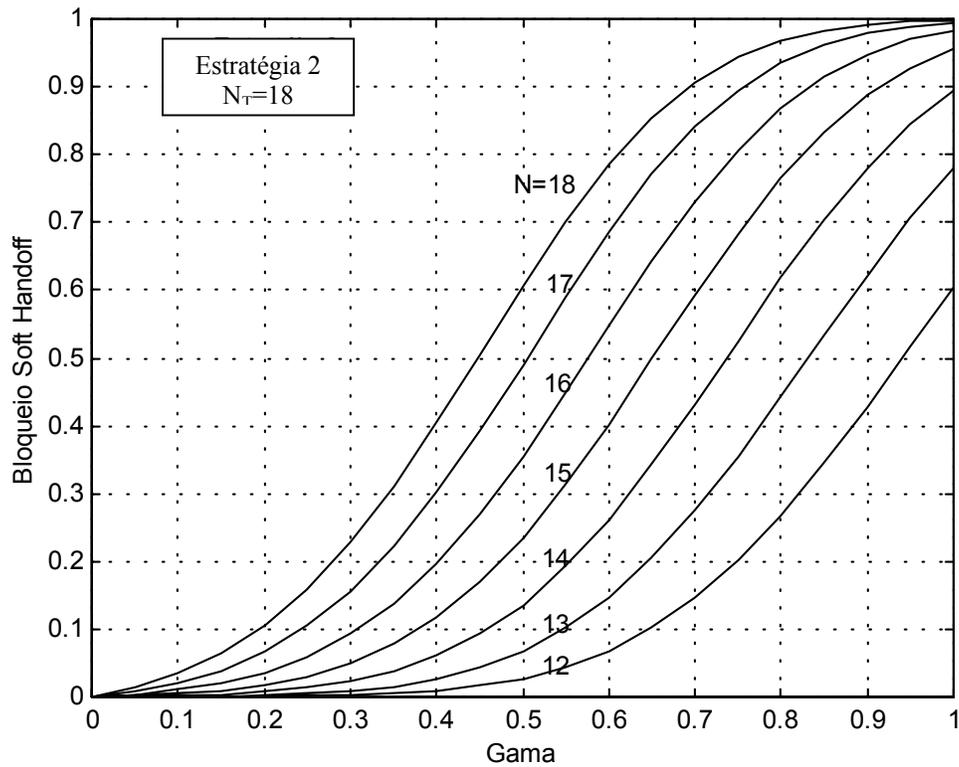


Figura 5.43 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* utilizando *Erlang* – três células – diminuição de canais

Como pode ser observado pela Figura 5.43, existirá uma diminuição da probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, como era de se esperar. Porém, existirá também uma diminuição do tráfego aparente suportado pela célula. Isto significa que existirão mais canais para cursar o tráfego de *soft handoff* e menos canais para cursar o tráfego na célula. A Tabela 5.4 mostra o tráfego aparente da célula com a diminuição do número de canais alocados na célula, para uma proporção de sobreposição entre células de 40%.

Tabela 5.4

Número de Canais	Prob. Bloqueio <i>Soft handoff</i> (%)	Tráfego ( <i>Erlang-B</i> )
18	40	11,5
17	30	10,7
16	20	9,38
15	12	9,01
14	7	8,2
13	3	7,4
12	1	6,61

A Figura 5.44 apresenta a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* utilizando *Bernoulli* e a Figura 5.45 apresenta uma comparação entre as duas distribuições.

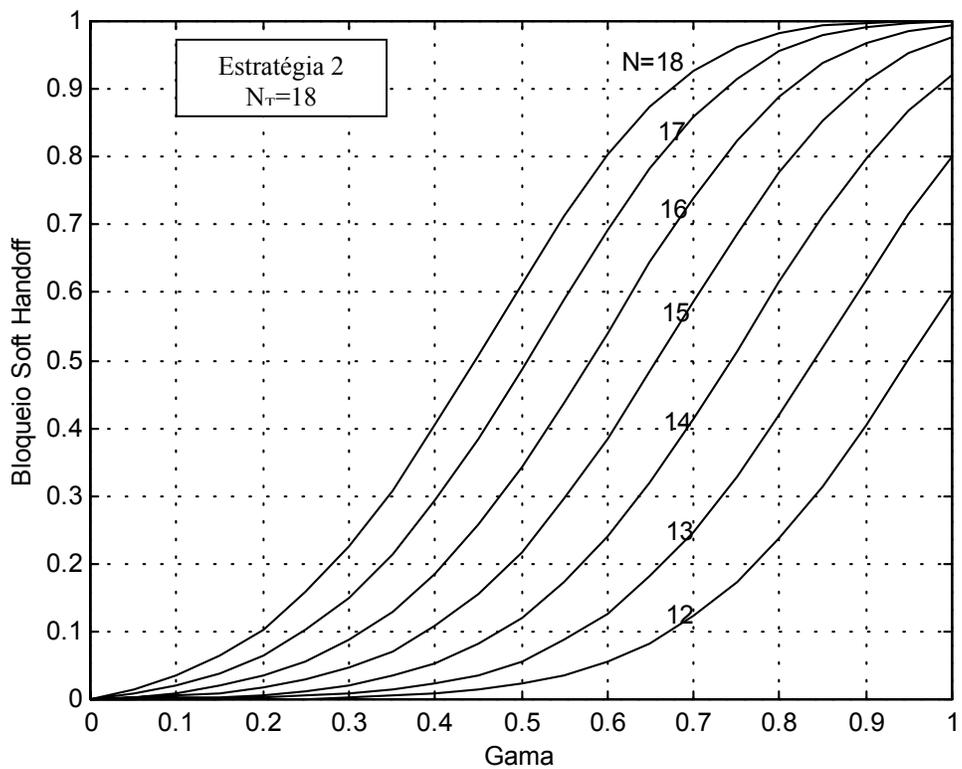


Figura 5.44 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* utilizando *Binomial* – três células – diminuição de canais

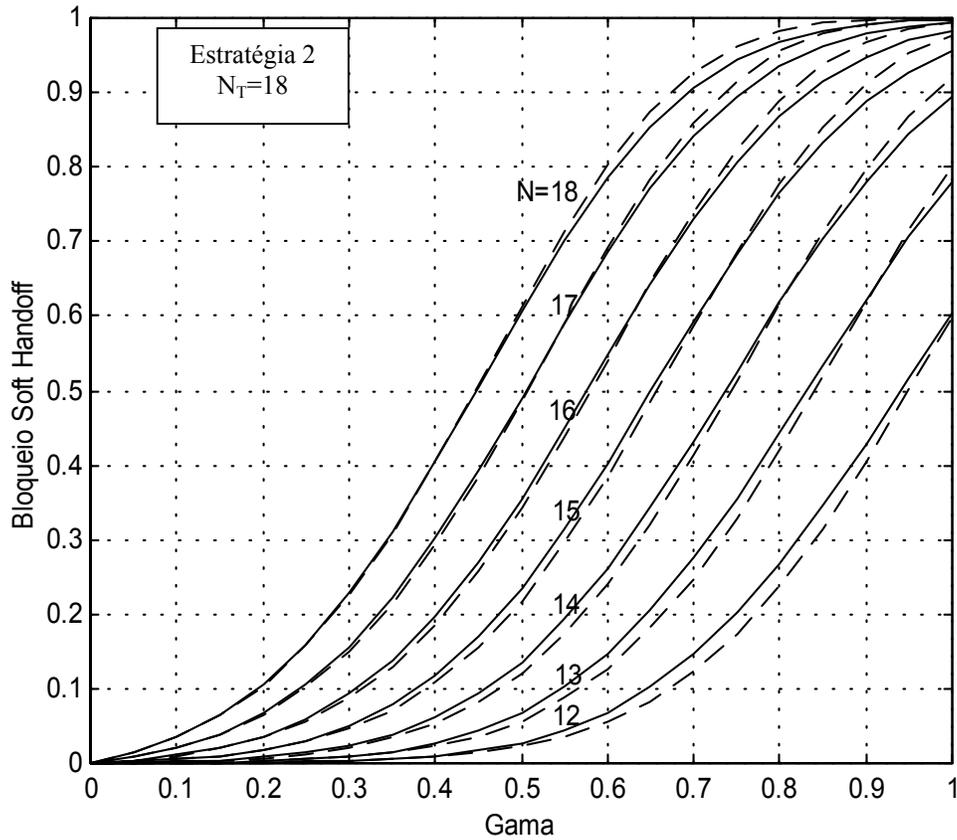


Figura 5.45 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* utilizando *Erlang-B* e *Binomial* – três células – diminuição de canais

Observar-se novamente a grande aproximação entre *Erlang-B* e *Bernoulli*. Na próxima estratégia, será utilizado somente *Bernoulli*, a exemplo do que foi feito para o caso de duas células.

### 5.4.3 Estratégia de Alocação 3 - Aumentando e Diminuindo os Canais

A próxima condição de análise será aquela em que se acrescentam canais à célula e diminui-se o número de canais internos. É importante observar que nesta estratégia existe uma diminuição do tráfego interno na célula, ou seja, uma diminuição do tráfego aparente, como observado na estratégia de alocação 2. Foram utilizados valores de  $N_T = 19, 20, 21, 22, 23$  e  $24$ . Para cada valor de  $N_T$ , variou-se o número de canais internos de  $N_{INT} = 18, 17, 16, 15, 14, 13$  e  $12$ . Para cada valor de  $N_T$ , são apresentadas as probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage*.

Para  $N_T=19$

As Figuras 5.46, 5.47 e 5.48 apresentam as probabilidades de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage*, respectivamente.

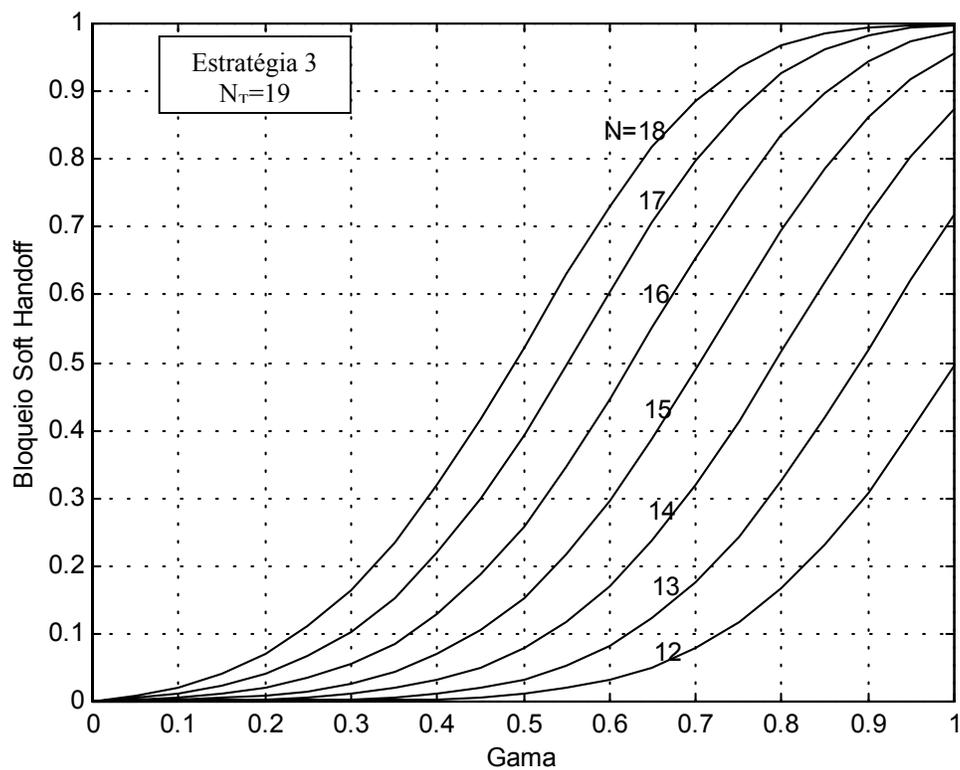


Figura 5.46 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* – três células – aumento e diminuição de

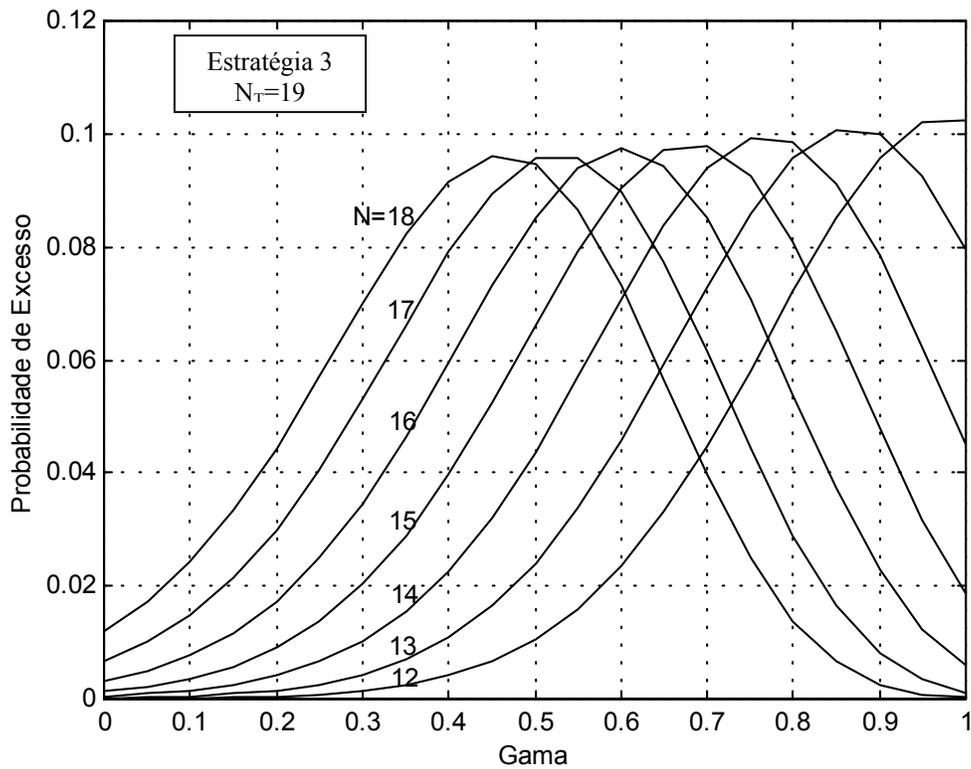


Figura 5.47 – Probabilidade de Excesso – três células – aumento e diminuição de canais

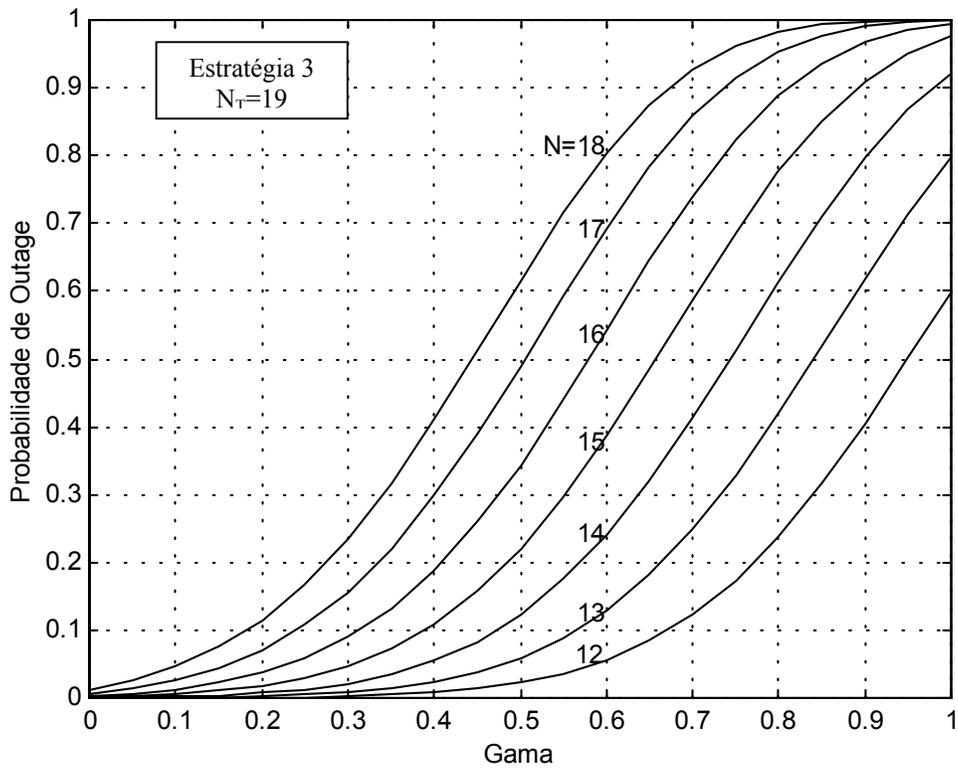


Figura 5.48 – Probabilidade de *Outage* – três células – aumento e diminuição de canais

**Para  $N_T=20$**

As Figuras 5.49, 5.50 e 5.51 apresentam as probabilidades de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage*, respectivamente.

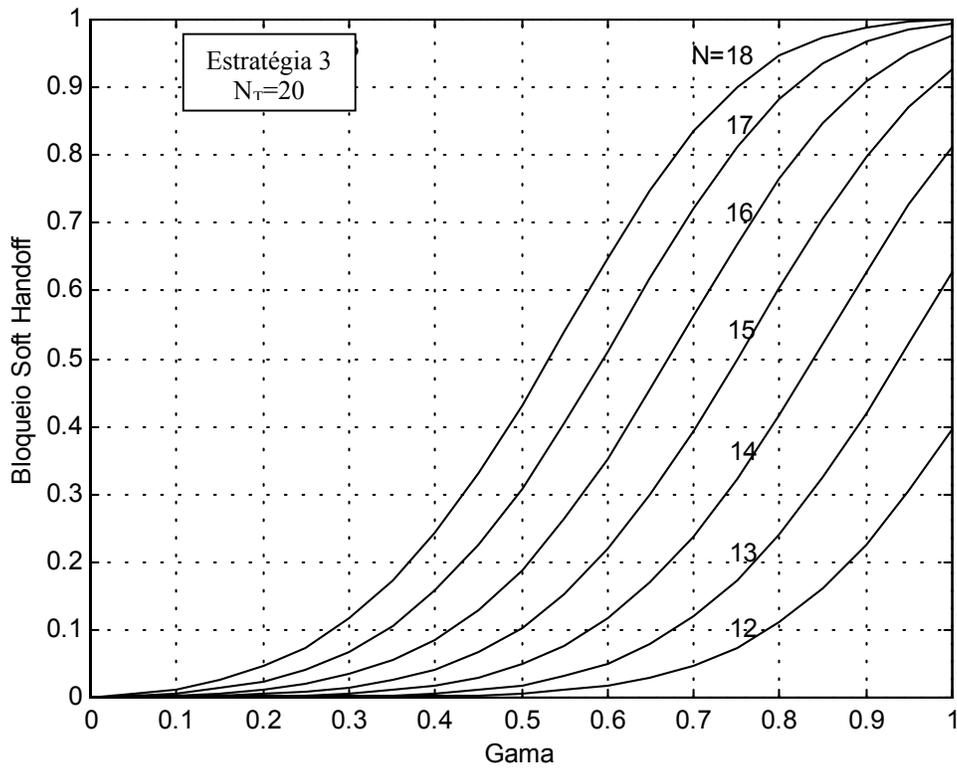


Figura 5.49 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* – três células – aumento e diminuição de canais

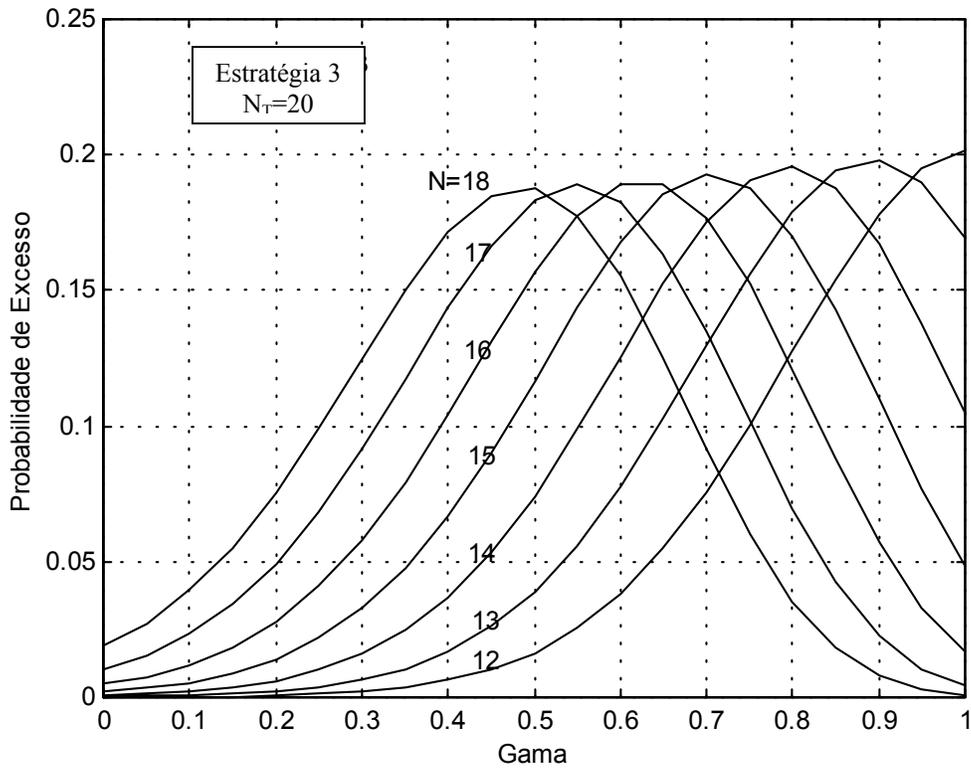


Figura 5.50 – Probabilidade de Excesso – três células – aumento e diminuição de canais

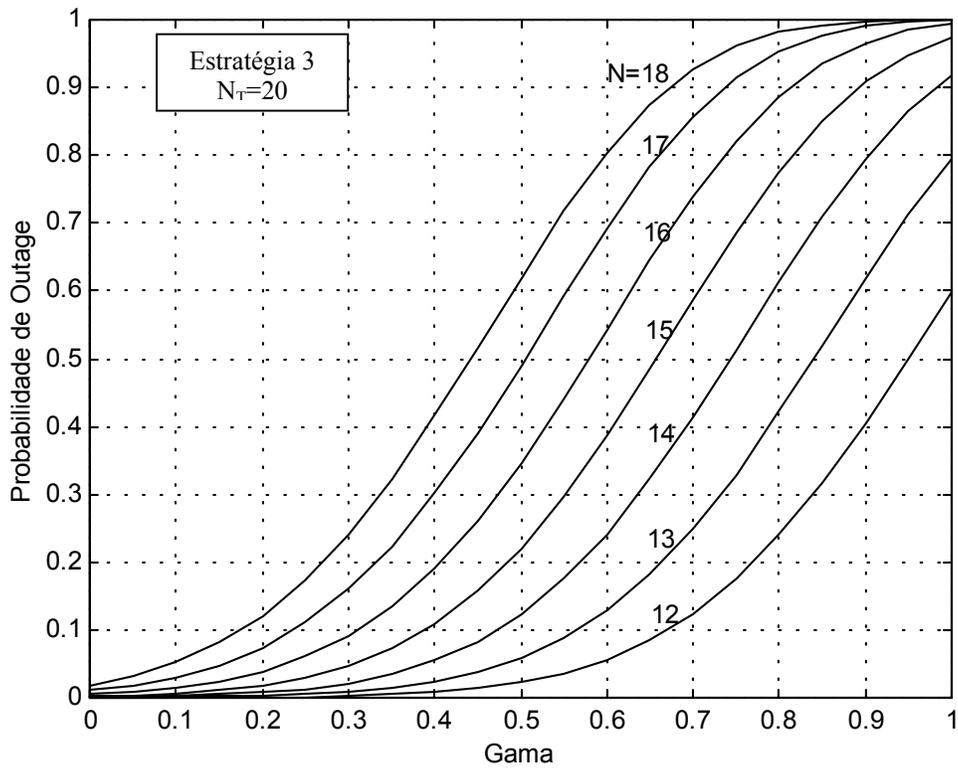


Figura 5.51 – Probabilidade de *Outage* – três células – aumento e diminuição de canais

**Para  $N_T=21$**

As Figuras 5.52, 5.53 e 5.54 apresentam as probabilidades de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage*, respectivamente.

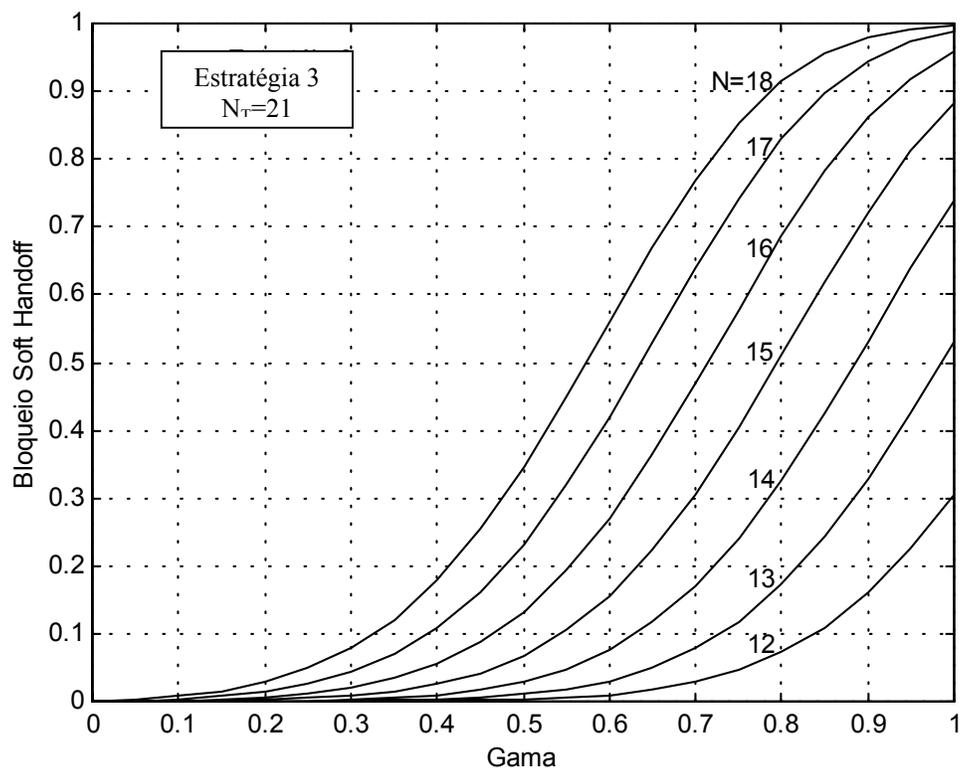


Figura 5.52 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* – três células – aumento e diminuição de canais

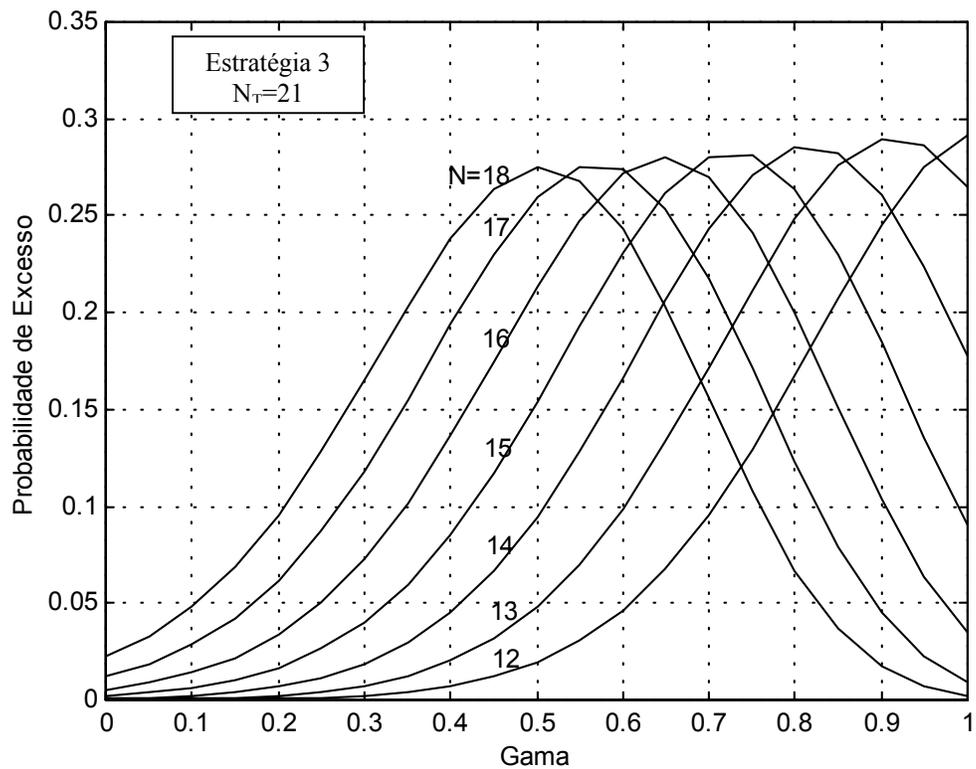


Figura 5.53 – Probabilidade de Excesso – três células – aumento e diminuição de canais

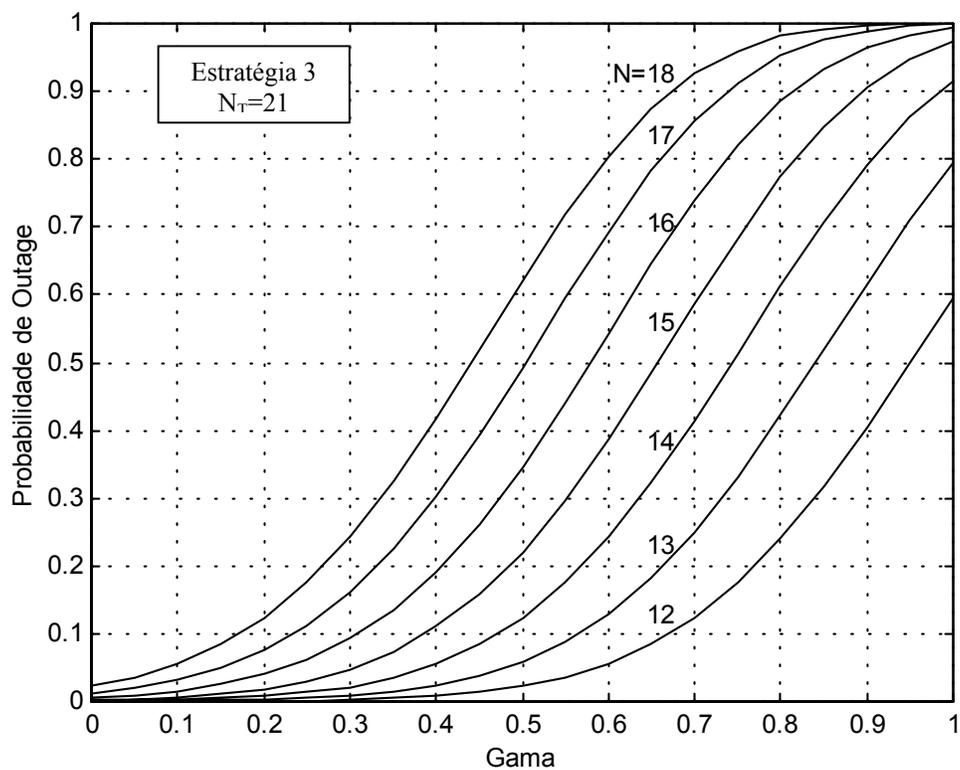


Figura 5.54 – Probabilidade de *Outage* – três células – aumento e diminuição de canais

**Para  $N_T=22$**

As Figuras 5.55, 5.56 e 5.57 apresentam as probabilidades de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage*, respectivamente.

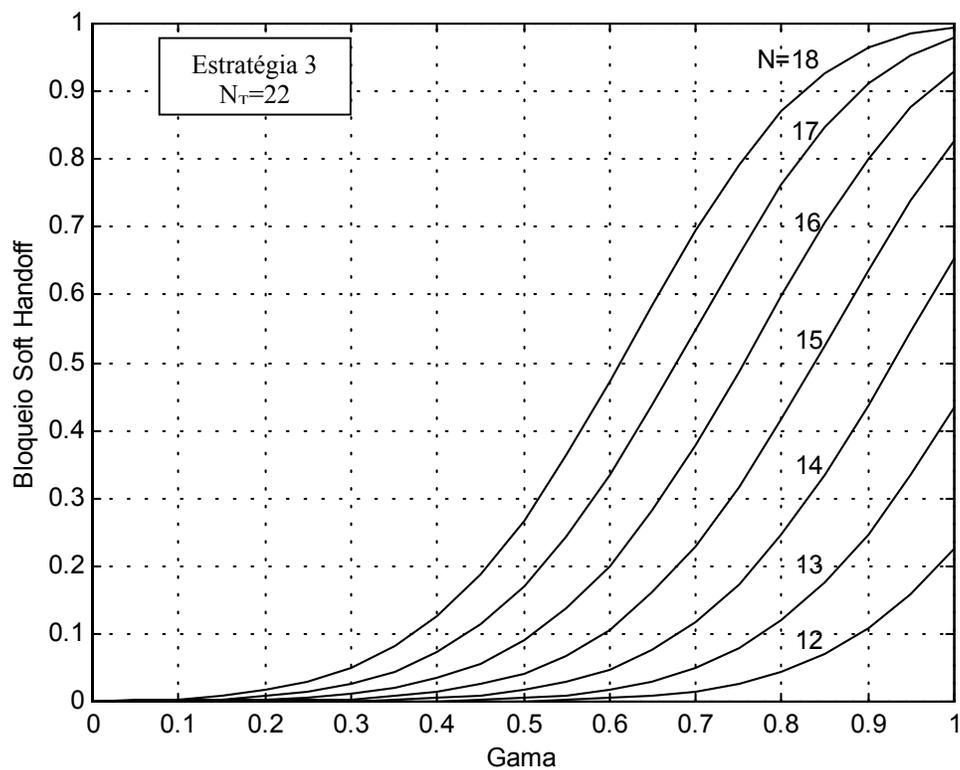


Figura 5.55 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* – três células – aumento e diminuição de canais

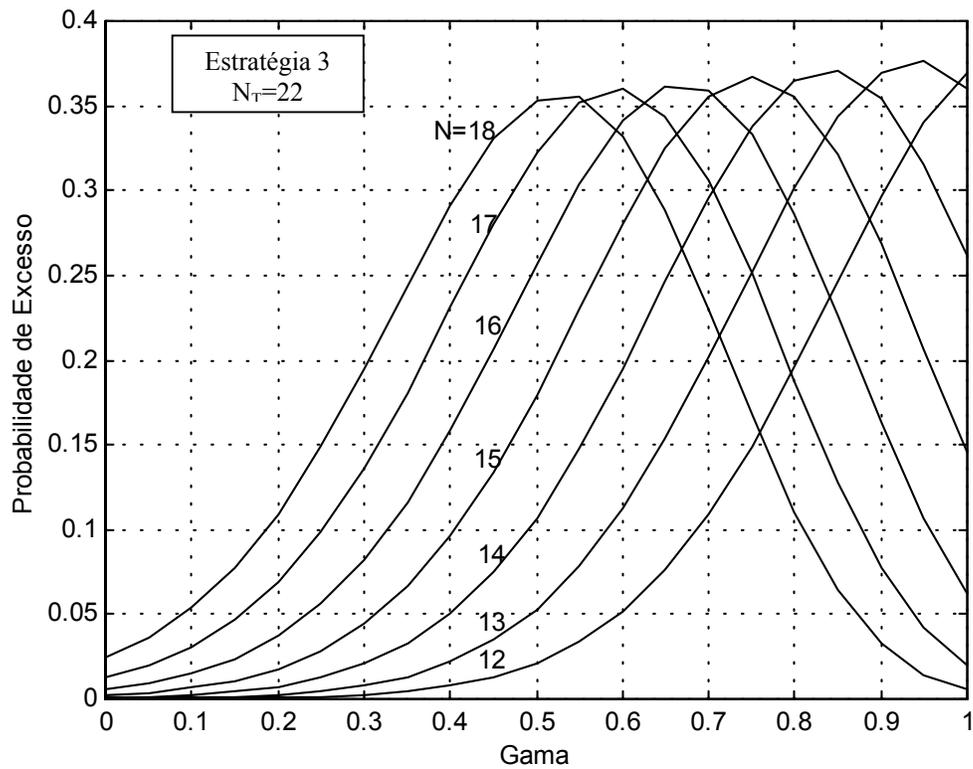


Figura 5.56 – Probabilidade de Excesso – tr\u00eas c\u00e9lulas – aumento e diminui\u00e7\u00e3o de canais

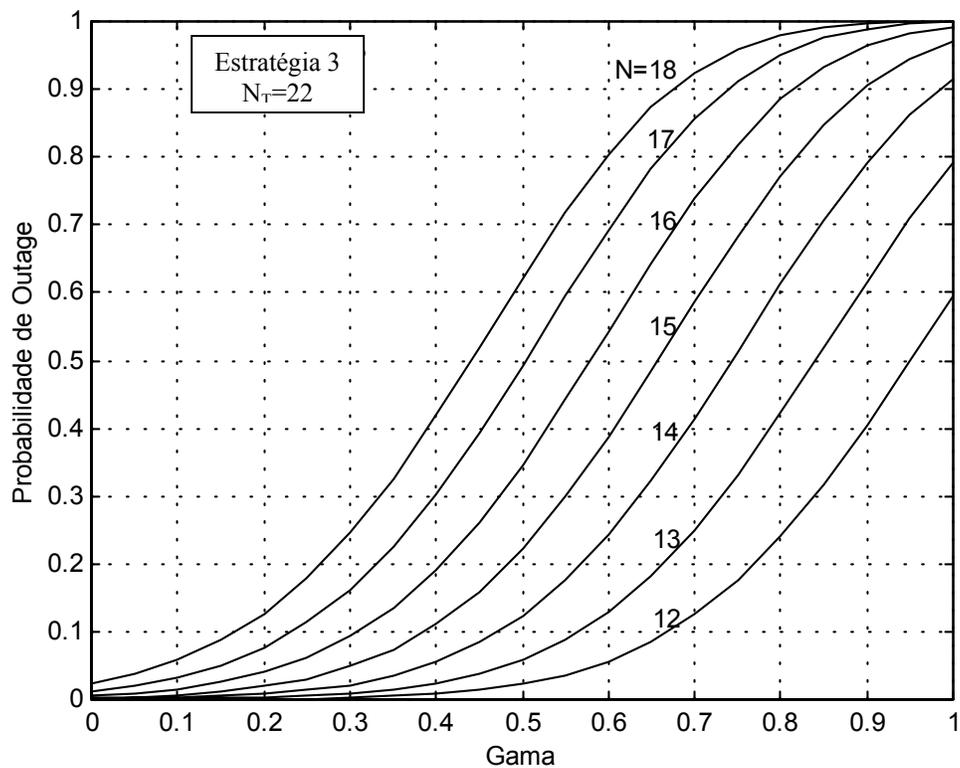


Figura 5.57 – Probabilidade de *Outage* – tr\u00eas c\u00e9lulas – aumento e diminui\u00e7\u00e3o de canais

**Para  $N_T=23$**

As Figuras 5.58, 5.59 e 5.60 apresentam as probabilidades de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage*, respectivamente.

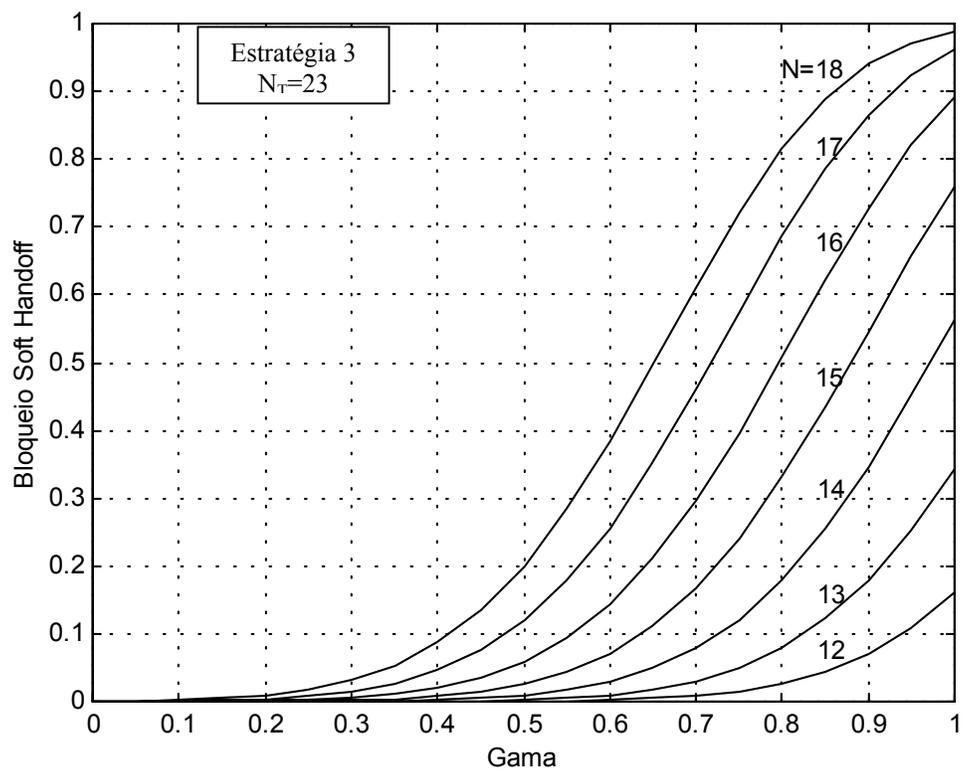


Figura 5.58 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* – aumento e diminuição de canais

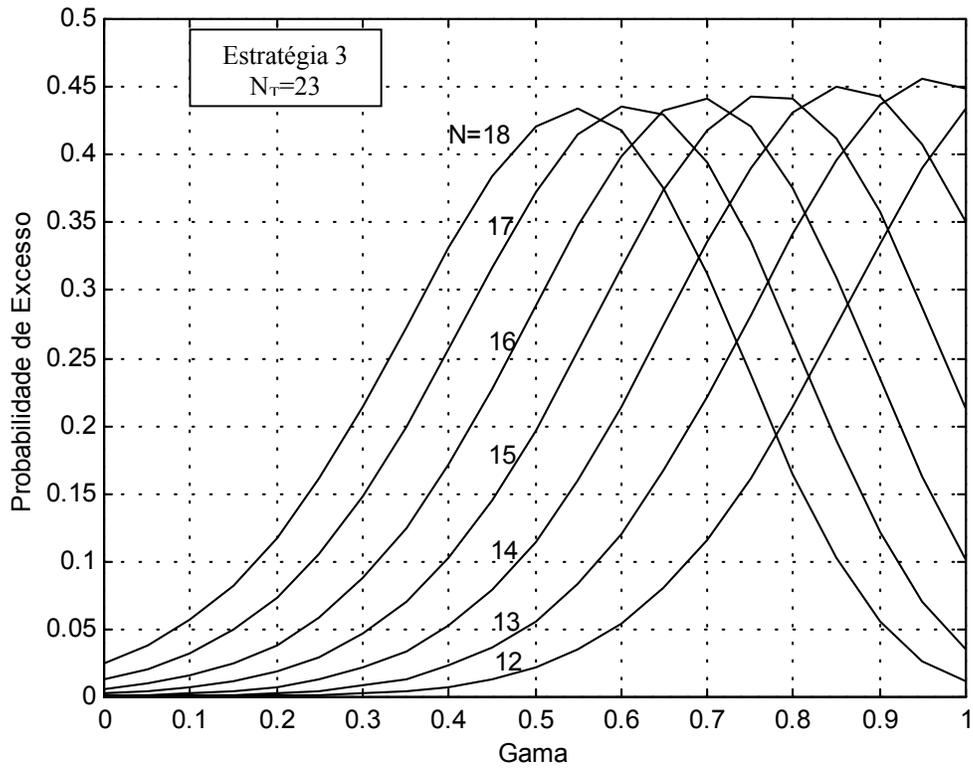


Figura 5.59 – Probabilidade de Excesso – aumento e diminuição de canais

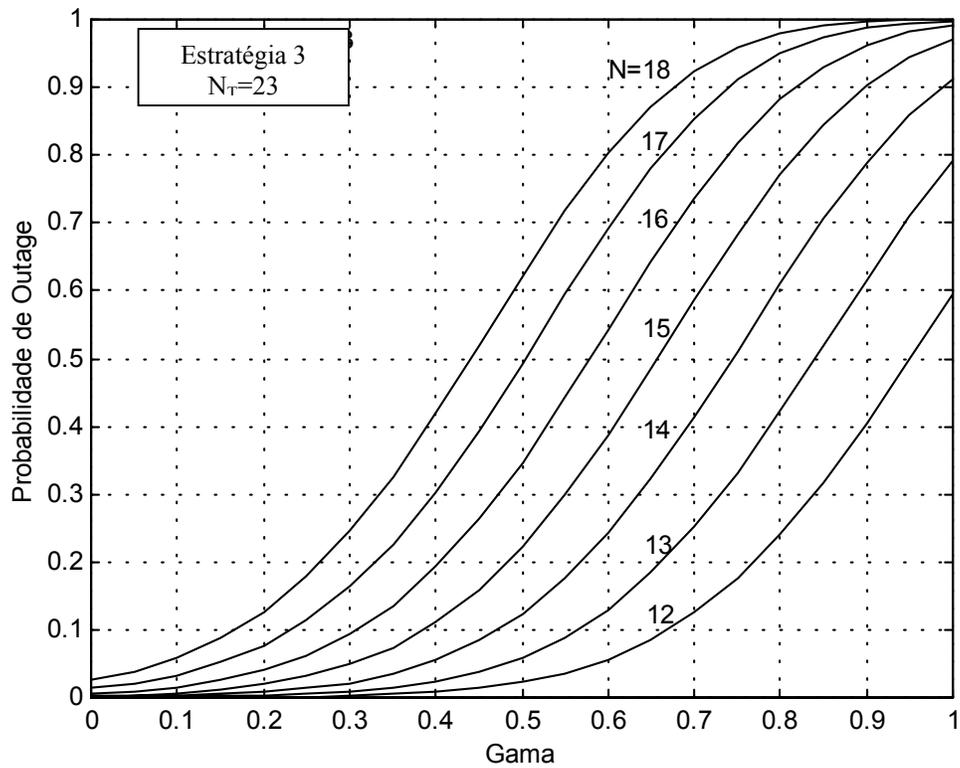


Figura 5.60 – Probabilidade de *Outage* – aumento e diminuição de canais

Para  $N_T=24$

As Figuras 5.61, 5.62 e 5.63 apresentam as probabilidades de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage*, respectivamente.

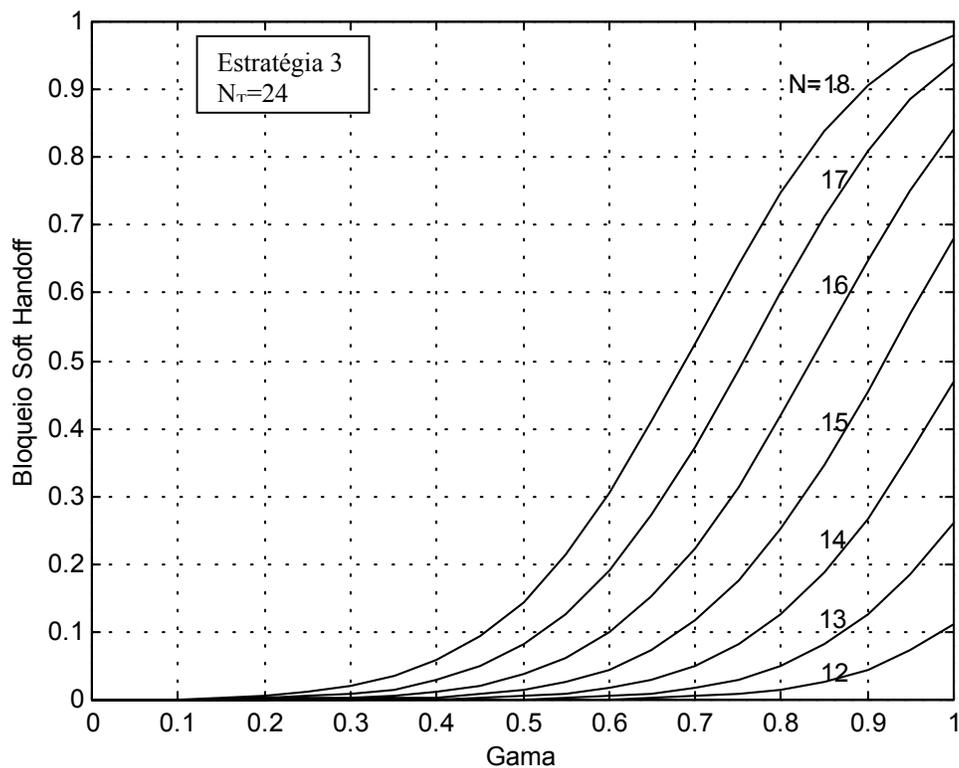


Figura 5.61 – Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff* – aumento e diminuição de canais

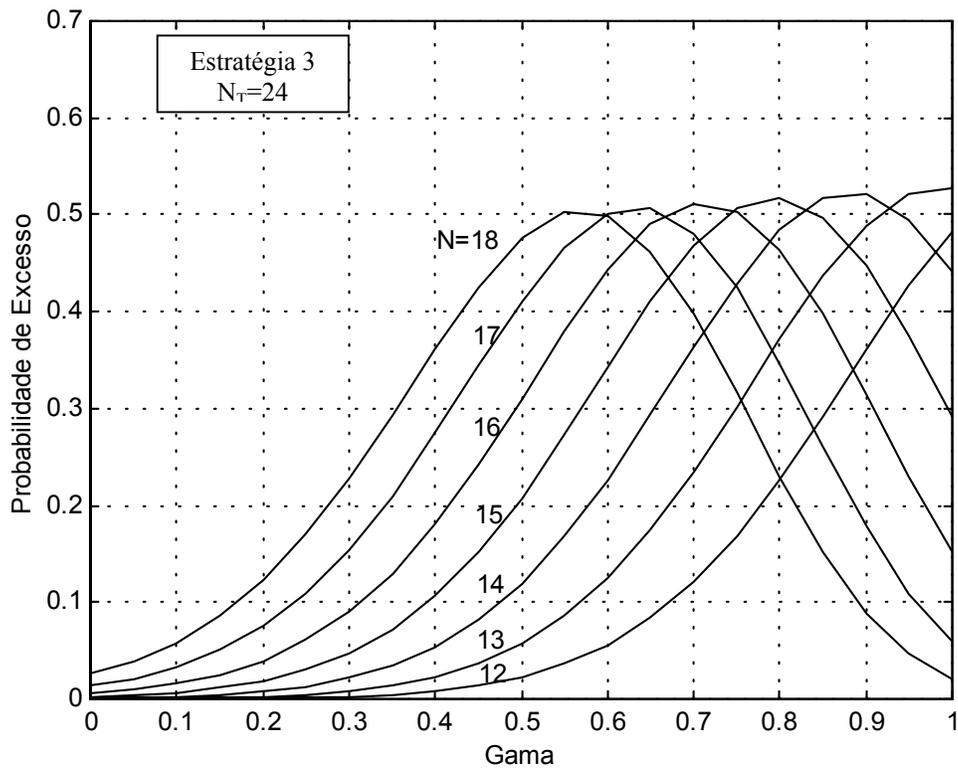


Figura 5.62 – Probabilidade de Excesso – aumento e diminui\u00e7\u00e3o de canais

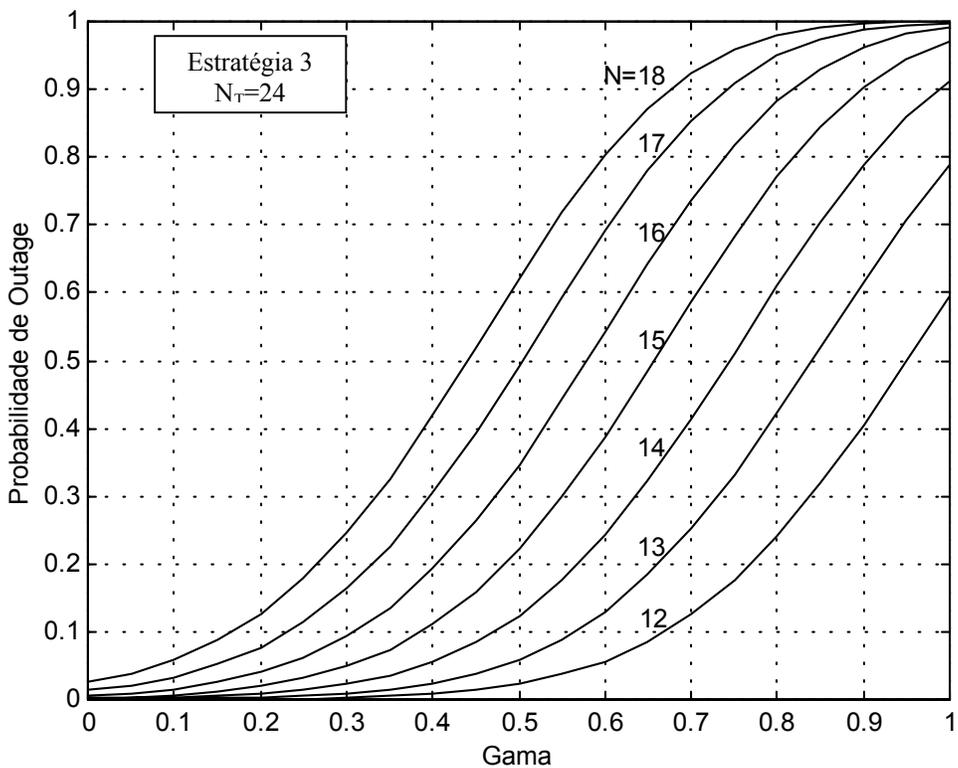


Figura 5.63 – Probabilidade de *Outage* – aumento e diminui\u00e7\u00e3o de canais

## 5.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados para duas e três células. A obtenção dos resultados de duas células serviu para uma análise comparativa de comportamento com o caso de três células. Observa-se um mesmo padrão de comportamento das curvas, inclusive na comparação das distribuições de *Erlang-B* e *Bernoulli*, para representação de tráfego nas células geradoras de *soft handoff*. Com os resultados apresentados neste capítulo é possível desenvolver uma metodologia de planejamento, que será apresentada no Capítulo 6.

Vale ressaltar que, para o caso de duas células, foi utilizada a ferramenta matemática *Matlab*. Embora esta ferramenta seja bastante interessante para implementação dos cálculos e exibição dos resultados, existe um problema de tempo computacional. Mesmo utilizando a distribuição *Binomial*, para o caso de duas células, foi constatado um elevado tempo para o cálculo das probabilidades. Desta forma, para o caso de três células, a utilização do *Matlab* tornou-se impraticável, sendo necessário utilizar a linguagem C. Mesmo utilizando a linguagem C, foi constatado um tempo razoável para levantamento de resultados. Isto encoraja a utilização de *Bernoulli* para representar o comportamento de tráfego na célula, seja para as células geradoras de tráfego de *soft handoff*, seja para as células que irão cursar este tráfego de *soft handoff*.



## 6 Metodologia de Planejamento

### 6.1 Introdução

Os Capítulos precedentes formaram a base para o desenvolvimento da proposta de planejamento deste trabalho. Principalmente os resultados obtidos no Capítulo 5 para duas células, e consolidados para três células, serão utilizados neste capítulo. Para efeito de demonstração do método proposto aqui, somente será utilizado o arranjo de três células. A não utilização dos resultados para duas células se justifica por sua limitada aplicação, servindo apenas estes resultados para consolidação dos resultados obtidos no arranjo de três células. Será verificado o desempenho das três estratégias de planejamento apresentadas na seção 5.2. Ressalta-se que o método proposto neste trabalho é uma mescla da primeira estratégia de alocação, seção 5.2.1, com a segunda estratégia de alocação, seção 5.2.2, o que resulta na terceira estratégia de alocação apresentada na seção 5.2.3. Sendo assim, as duas primeiras estratégias servem de base para a análise a ser realizada, considerando as probabilidades de bloqueio de *soft handoff* e *outage*.

Este capítulo se inicia fazendo uma análise das probabilidades de bloqueio de *soft handoff*, excesso e *outage*. Como será visto, é importante avaliar o significado destas probabilidades do ponto de vista numérico, com o objetivo de identificar valores a serem atendidos. Em seguida, será feito, para cada uma das estratégias, um exercício de planejamento, o qual considera como referência os valores de projeto comumente utilizados na prática e apresentados na segunda estratégia. O capítulo é concluído com uma análise da estratégia proposta.

Em se tratando da proposta de uma nova técnica de planejamento, é necessário assumir algumas condições de contorno, com o estabelecimento de valores de referência. Os valores das probabilidades a serem especificados é uma questão crucial para o dimensionamento do sistema. Sendo assim, este capítulo tem por objetivo apresentar um exercício de planejamento utilizando as probabilidades desenvolvidas. Neste exercício serão considerados valores para as probabilidades. Vale, portanto, ressaltar que estes

valores serão utilizados para o exercício em questão, podendo variar dependendo do desempenho exigido do sistema. Numa abordagem mais ampla de planejamento, considerando outros parâmetros, os valores estabelecidos para as probabilidades de bloqueio de *soft handoff* e *outage* representam um importante ponto de apoio, tanto para o planejamento propriamente dito quanto para estabelecer valores de desempenho a serem atingidos pelo sistema em operação.

## **6.2 Análise das Probabilidades**

Como apresentado no Capítulo 2, são utilizadas comumente duas metodologias para planejamento. A primeira considera a interferência no sistema que, em geral, é complexa, e por esta razão carece de condições práticas para uso no planejamento dos sistemas. A segunda leva em consideração o fator de redução, que é fácil de ser utilizado, porém, apresenta uma abordagem por demais simples. Sendo assim, a proposta deste trabalho é incluir, na etapa de planejamento do sistema, parâmetros que permitam estabelecer índices de desempenho, levando em consideração as probabilidades de *outage* e bloqueio de *soft handoff* e utilizando elementos das duas técnicas empregadas comumente para realizar o planejamento.

As probabilidades consideradas no planejamento são as seguintes:

- Probabilidade de bloqueio na célula,
- Probabilidade de bloqueio de *soft handoff* e
- Probabilidade de *outage*.

A probabilidade de bloqueio na célula utiliza o valor de 2%, comumente encontrado em projetos de sistemas telefônicos. Na estratégia de alocação utilizada comumente, quando se diminui o número de canais para atendimento do tráfego interno da célula, provoca-se um aumento da probabilidade de bloqueio da célula, caso se mantenham o mesmo tráfego oferecido e o número de canais na célula. Para obter-se o bloqueio da célula de 2%, é necessário reduzir o tráfego oferecido, criando as figuras de tráfego real e tráfego

aparente. A implicação disto é, sem dúvida, uma diminuição da capacidade de se escoar o tráfego. Fisicamente, isto deve significar a redução da área da célula para um tráfego uniformemente distribuído. No presente trabalho, não será feita nenhuma conjectura a respeito desta alteração na área de cobertura. Vale lembrar que o planejamento nunca acontece para uma única célula, visto que é sempre uma ação integrada para atendimento do tráfego demandado por uma certa região, o qual será atendido por um conjunto de células. O propósito aqui é apresentar uma sistemática de planejamento focada no comportamento das probabilidade de bloqueio de *soft handoff* e *outage*, visando atingir valores pré-determinados para uma célula, a qual deve suportar o tráfego de *soft handoff* gerado por células vizinhas.

No planejamento comumente utilizado, somente são consideradas ações de alteração de canais alocados na célula para atenderem ao tráfego de *soft handoff*, penalizando, assim, o tráfego interno das células. Porém, é possível variar também a proporção de sobreposição entre células para o atendimento dos requisitos de probabilidades. Para isto, existem parâmetros do sistema que podem ser alterados para este fim, sendo alguns deles a potência de transmissão, o *down tilting* da antena, a alteração dos limiares de *soft handoff*, etc, que definem contornos lógicos das células. Uma vez que a alteração destes parâmetros modifica a proporção de sobreposição, bem como outros parâmetros do sistema, estes são elementos que devem ser considerados nas etapas de planejamento como um todo.

Nos próximos itens será feito um detalhamento das probabilidades de bloqueio de *soft handoff* e *outage*, para chegar-se a valores que representem condições satisfatórias de operação. Serão explorados os resultados obtidos com a primeira e a segunda estratégias de alocação, apresentadas no Capítulo 5. Cada uma destas estratégias permite avaliar os valores para as probabilidades em questão. Os valores encontrados servem de referência e devem ser analisados caso-a-caso nos sistemas práticos.

### 6.2.1 Probabilidade de Bloqueio de *Soft handoff*

O bloqueio de *soft handoff* é a condição onde um usuário na região de sobreposição entre células não consegue canal para realização do *soft handoff*. Portanto, a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* determina, para uma certa região de sobreposição, qual a probabilidade de um usuário não conseguir acessar o canal de outra célula para realização do *soft handoff*. O sistema CDMA necessita do *soft handoff* como forma de diminuir a potência do móvel que está em condição de *soft handoff*. Esta é, portanto, uma condição crítica, pois o bloqueio de *soft handoff* pode implicar, além de mais interferência no sistema, na queda de chamada por baixa intensidade de sinal, dependendo da posição do móvel. Este novo parâmetro possibilita avaliar esta condição de bloqueio, estabelecendo limites a serem atendidos.

O valor da probabilidade de bloqueio de *soft handoff* é um ponto em aberto e deverá ser definido pela operadora no seu planejamento. Além de ser utilizado no planejamento propriamente dito, este valor poderá ser empregado como uma condição a ser atendida na operação do sistema, a exemplo do que acontece, por exemplo, no sistema telefônico, onde o bloqueio deve ser de 2%.

Na seção 5.4.2 foi apresentada a Tabela 5.4, que mostra o comportamento do bloqueio de *soft handoff* para a segunda estratégia de alocação, considerando uma região de sobreposição de 40%. Como subsídio para análise desta probabilidade, serão utilizados os valores desta tabela, que está reproduzida abaixo.

Tabela 6.1

Número de Canais	Prob. Bloqueio <i>Soft handoff</i> (%)	Tráfego ( <i>Erlang-B</i> )
18	40	11,5
17	30	10,7
16	20	9,38
15	12	9,01
14	7	8,2
13	3	7,4
12	1	6,61

Vale observar que, na primeira e na terceira colunas, são apresentados valores conhecidos e utilizados no planejamento de sistemas celulares, mostrando o tráfego oferecido a ser considerado. A segunda coluna, porém, utiliza um novo elemento que é fruto do presente trabalho. A técnica de subtrair canais para atendimento do tráfego de *soft handoff*, é comumente utilizada no planejamento de sistemas CDMA, onde é utilizado um fator de redução. Pode-se observar na tabela que, à medida em que são reservados canais para *soft handoff*, a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* diminui significativamente, caindo de 40% com 18 canais para 7% com 14 canais. Neste último caso, são reservados quatro canais para atendimento do tráfego de *soft handoff*. Vale observar, porém, que a reserva de canais para *soft handoff* implica numa diminuição do tráfego oferecido, sendo, no caso apresentado, uma redução de 11,5 *erlangs* para 8,2 *erlangs*, respectivamente, gerando assim a designação de tráfego aparente e tráfego real, respectivamente. A diminuição do tráfego oferecido implica na necessidade de um redimensionamento da célula, caso que não será tratado aqui, como já mencionado anteriormente.

Os valores apresentados no parágrafo anterior são utilizados comumente para representar a situação de reserva de canais para cursar o tráfego de *soft handoff*. O valor de 7% para a probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, significa uma probabilidade elevada para sistemas CDMA. Para o exercício de planejamento aqui apresentado, será utilizado o valor de 2% a ser atendido, para a probabilidade de bloqueio de *soft handoff*; ou seja, é permitido um bloqueio de até 2%. Este valor é um dado de entrada no dimensionamento do sistema, sendo um valor a ser atendido tanto no planejamento quanto na operação.

Um resultado interessante da utilização da probabilidade de bloqueio de *soft handoff* é a possibilidade da determinação da proporção de sobreposição entre células num sistema que esteja em operação. A determinação desta região de sobreposição não é uma tarefa fácil, pois depende fortemente das condições de propagação. Para a determinação desta proporção, parte-se do bloqueio de *soft handoff* para a determinação da proporção de sobreposição. Neste caso, o sistema deverá fornecer a probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, ou fornecer indicadores onde seja possível calcular esta probabilidade. Por exemplo, seja um sistema CDMA com  $N_T=18$  canais alocados na célula, sendo  $N=16$

canais para atendimento do tráfego interno, existindo, portanto, dois canais para tráfego de *soft handoff*. Supondo-se que o bloqueio de *soft handoff* foi calculado como sendo de 20%, recorre-se à Figura 5.43 para a determinação da proporção de sobreposição. Neste caso, chega-se a uma proporção de sobreposição de 40%. A determinação desta proporção pode ser utilizada, em conjunto com outros parâmetros do sistema, na avaliação do desempenho, resultando em ações para corrigir eventuais problemas de excessiva sobreposição entre células.

### 6.2.2 Probabilidade de *Outage*

A probabilidade de *outage* está relacionada diretamente com a interferência, causada por canais ativos na célula, a mais que o limite onde a interferência pode ser desprezada. Este valor limite, acima do qual a interferência deve ser considerada, foi fixado como sendo de 18 canais alocados na célula. Sendo assim, acima de 18 canais ativos na célula, existe uma probabilidade de *outage*.

Analisando a primeira estratégia de alocação, onde são simplesmente acrescentados canais para atendimento de tráfego de *soft handoff*, obtém-se da Figura 5.40, para uma proporção de sobreposição entre células de 40%, um valor por volta de 43% de probabilidade de *outage*. Este valor é, claramente, inaceitável pois apresenta uma chance muito grande de interferência no sistema, contrastando com o valor de 0% definido para 18 canais. Para efeito de demonstração, será utilizado um valor de probabilidade de *outage* de até 8% como parâmetro básico de análise da metodologia proposta. Para atender a este requisito, sem alterar o de número de canais alocados na célula, seria necessário variar os parâmetros de RF para alteração da proporção de sobreposição entre células de 40% para um valor por volta de 15%. Neste caso, a probabilidade de *outage* ficaria por volta de 8%. A exemplo do que foi feito para a probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, será fixado em 8% o valor de probabilidade de *outage* a ser utilizado no planejamento. Ressalta-se que este valor serve somente como referência para demonstração da técnica de planejamento a ser apresentada na próxima seção.

Nos resultados obtidos no Capítulo 5, foi também apresentada a probabilidade de excesso, que é um caso especial da probabilidade de *outage*, considerando a perda da chamada por falta de canais para estabelecer o *soft handoff*. Como já mencionado, não é este o caso real. Porém, o valor desta probabilidade pode ser utilizado na análise do planejamento, em conjunto com a probabilidade de *outage* e bloqueio de *soft handoff*. No exercício de planejamento, apresentado a seguir, não foi utilizada a probabilidade de excesso, concentrando-se nas probabilidades de *outage* e bloqueio de *soft handoff*.

### **6.3 Método de Planejamento**

Nesta seção são apresentados os procedimentos para o planejamento do sistema com base nas probabilidades definidas na seção 6.2. Em comum com a metodologia mais simples, que utiliza um fator de redução descrita na seção 2.5.2, o método proposto faz uso do tráfego aparente para se determinar o tráfego real. Em comum com a metodologia mais complexa, que utiliza limite de interferência, descrito na seção 2.5.3, o método proposto se preocupa com a questão da interferência, refletida na probabilidade de *outage*. Em adição a ambas, leva-se em consideração o bloqueio de *soft handoff*, que é um elemento novo no planejamento do sistema. A determinação do tráfego real na metodologia proposta, por outro lado, será consequência tanto do bloqueio de *soft handoff* quanto da interferência, utilizando a probabilidade de *outage*. Portanto, a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* e a probabilidade de *outage* são elementos utilizados para dimensionar o sistema, além de outros parâmetros necessários como probabilidade de bloqueio na célula e parâmetros de RF que determinam a proporção de sobreposição.

O método de planejamento proposto parte de um número nominal de canais para o qual o nível de interferência pode ser desprezado. Como já definido anteriormente, este número é de 18 canais. Para este valor, determina-se o tráfego aparente utilizando a tabela de *Erlang-B* em função do grau de serviço especificado. Utilizando-se um grau de serviço de 2%, chega-se ao tráfego aparente de 11,5 *erlangs*. Este é o ponto de partida para se aplicar a técnica de planejamento proposta. Para um fator de sobreposição entre células, que deve ser conhecido, adicionam-se ou subtraem-se canais para atender aos requisitos de

probabilidade de bloqueio de *soft handoff* e de *outage*. Para efeito de exercício do método de planejamento, será utilizada uma proporção de sobreposição de 40%, lembrando que a variação deste valor é uma outra dimensão que pode ser explorada no planejamento como um todo.

Nas próximas seções apresentam-se as três estratégias de alocação, utilizando o arranjo de três células, e comentam-se os resultados para as condições estabelecidas no parágrafo anterior. A última estratégia sintetiza a técnica de planejamento proposta neste trabalho, servindo as outras duas estratégias como referência para análise da técnica proposta.

### 6.3.1 Estratégia de Alocação 1 – Aumento de Canais

Na primeira estratégia de alocação, admite-se apenas acrescentar canais aos canais nominais, para atendimento do *soft handoff*, conseguindo, assim, uma diminuição da probabilidade de bloqueio de *soft handoff*. A Figura 5.34 apresenta o comportamento da probabilidade de bloqueio de *soft handoff* em função da proporção de sobreposição entre células, onde são incluídos de 1 a 6 canais aos 18 canais nominais, obtendo-se de 19 a 24 canais alocados na célula. Utilizando o valor de 40% de sobreposição, a Tabela 5.3 apresenta a probabilidade de bloqueio de *soft handoff*. Esta tabela está reproduzida abaixo, por conveniência.

Tabela 6.2

$N_T$	Prob. Bloqueio de <i>Soft handoff</i> (%)
18	40
19	33
20	27
21	20
22	14
23	10
24	7

Vale observar que a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* somente chega a 7% para 24 canais alocados na célula, não atendendo aos 2% estabelecidos na seção anterior. Para este número de canais alocados na célula, a probabilidade de *outage* ficará por volta de 44% para 24 canais, como mostra a Figura 5.40. Este valor é bastante acima dos 8% especificados.

Conclui-se, portanto, que somente adicionando-se canais aos nominais não se chega a um bom resultado. Analisando os resultados, verifica-se que, se por um lado houve uma diminuição da probabilidade de bloqueio de *soft handoff*, por outro, a probabilidade de *outage* ficou muito acima do especificado.

### 6.3.2 Estratégia de Alocação 2 – Diminuição de Canais

Nesta estratégia são subtraídos canais dos canais nominais. Quanto ao bloqueio de *soft handoff*, já foi verificado pela Tabela 6.2 que, para atingir o especificado, são necessários seis canais para cursar o tráfego de *soft handoff*, obtendo, assim, uma probabilidade de bloqueio de *soft handoff* de 1%, com tráfego real de 6,61 *erlangs*, sendo o tráfego aparente de 11,5 *erlangs*.

Porém, apenas subtraindo-se canais dos canais nominais, a interferência não ultrapassará aquela obtida com o uso de canais nominais, sendo definida como 0% para este caso, ficando, portanto, abaixo dos 8% especificados. Outro ponto a ser analisado é a capacidade de tráfego real do sistema, que diminuirá para se atingir a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* desejada, passando de um tráfego aparente de 11,5 *erlangs* para um tráfego real de 6,61 *erlangs*. Esta não é uma situação razoável, por privilegiar o tráfego de *soft handoff*, em detrimento da capacidade do sistema.

### 6.3.3 Estratégia de Alocação 3 – Aumentando e Diminuindo os Canais

Um compromisso entre se adicionar e se subtrair uma quantidade de canais em torno dos canais nominais poderá ser atingido para se atenderem os critérios de projeto de sistema, no que diz respeito à questão da interferência e de bloqueio de *soft handoff*. Parte-se, portanto, para o exercício de planejamento, onde são adicionados canais aos nominais e subtraídos canais para liberar canais para atendimento do tráfego de *soft handoff*. A seguir, são analisadas estas alternativas, considerando-se uma proporção de sobreposição de 40% nos resultados do Capítulo 5.

Para um total de 19 canais, verifica-se, na Figura 5.46, que são necessários seis canais para atendimento do tráfego de *soft handoff* para atingir a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* abaixo de 2%, restando, portanto, 12 canais para cursar o tráfego interno. Pela Figura 5.48, observa-se que a probabilidade de *outage* fica bem abaixo dos 8% especificados.

Para um total de 20 canais, verifica-se, na Figura 5.49, que são necessários sete canais para atendimento do tráfego de *soft handoff*, para que a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* fique abaixo de 2%, restando, portanto, 13 canais para cursar o tráfego interno. Pela Figura 5.51, observa-se que a probabilidade de *outage* fica, ainda, abaixo dos 8% especificados.

Para um total de 21 canais, verifica-se, na Figura 5.52, que são necessários oito canais para atendimento do tráfego de *soft handoff*, para que a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* fique abaixo de 2%, restando, portanto, 13 canais para cursar o tráfego interno. Pela Figura 5.57, observa-se que a probabilidade de *outage* fica bem abaixo dos 8% especificados.

Para um total de 22 canais, verifica-se, na Figura 5.55, que são necessários sete canais para atendimento do tráfego de *soft handoff*, para que a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* fique por volta de 2%, restando, portanto, 15 canais para cursar o tráfego interno.

Pela Figura 5.54, observa-se que a probabilidade de *outage* fica acima dos 8% especificados. Utilizando, porém, oito canais para cursar o tráfego de *soft handoff* e quatorze para o tráfego interno da célula, chega-se a uma probabilidade de bloqueio de *soft handoff* inferior a 2% e a uma probabilidade de *outage* próxima a 8%.

Esta última condição parece bastante razoável, pois, comparando-se com a segunda estratégia, onde se obteve um tráfego real de 6,61 *erlangs*, obtém-se, no exercício de planejamento realizado, um tráfego real de 8,2 *erlangs*, atendendo aos requisitos de bloqueio de *soft handoff* e *outage*.

#### **6.4 Conclusão**

Mostrou-se, neste capítulo, uma nova estratégia de planejamento de sistemas CDMA, empregando a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* e a probabilidade de *outage* a partir dos resultados obtidos no Capítulo 5. Procurou-se salientar a utilização destas probabilidades no intuito de um adequado planejamento. Não foram considerados outros parâmetros, normalmente utilizados no planejamento, tais como os parâmetros de RF para a alteração da região de sobreposição. Sendo assim, o exercício apresentado explorou somente o atendimento de requisitos quanto à probabilidade de bloqueio de *soft handoff* e probabilidade de *outage*. Verifica-se, claramente, a possibilidade de alteração de outros requisitos de sistemas para acomodar outras abordagens de planejamento.

O processo interativo apresentado na seção 6.3.3 possibilita convergir para uma solução de compromisso para atendimento das probabilidades especificadas. Este processo pode ser feito de forma automática, estabelecendo-se um algoritmo que permita esta convergência. O grau de liberdade permitido pelo processo torna-se bastante interessante para explorar várias possibilidades de planejamento, onde se pode jogar com os valores das probabilidades e outros parâmetros do sistema.



## 7 Conclusão

### 7.1 Introdução

A atual expansão mundial dos sistemas móveis não deve ser uma surpresa, afinal, sempre foi um anseio humano a possibilidade de comunicação em qualquer local. O par de fios foi a técnica encontrada para viabilizar a comunicação desde os tempos de *Graham Bell*. Timidamente, desde as experiências de *Marconi*, vem sendo trilhado um longo caminho em direção à tão desejada comunicação pessoal. Do ponto de vista tecnológico, isso sempre foi um grande desafio para a engenharia de comunicações. A partir dos anos 80, há bem pouco tempo se comparado à penetração de outros sistemas, a penetração de sistemas móveis tem sido explosiva, principalmente na década de 90, com a introdução dos sistemas digitais. A introdução do sistema CDMA, na primeira metade da década de 90, foi um marco na evolução dos sistemas celulares, por apresentar uma técnica de acesso com características muito convenientes para aplicação em sistemas móveis, como por exemplo o reuso 1. Porém, juntamente com estas novas características, surgem também desafios que devem ser solucionados, como, por exemplo, um adequado planejamento considerando-se o processo de *soft handoff*.

O sistema celular tem como característica marcante uma permanente incerteza no seu desempenho, devido à variabilidade do meio móvel. Este meio é bastante agressivo exigindo, portanto, técnicas e soluções que permitam estabelecer a comunicação com certa probabilidade de sucesso, vencendo os desafios impostos por ele. Uma das tarefas mais desafiadoras em sistemas móveis é o planejamento celular, o qual irá ditar fortemente a qualidade do sistema. Por outro lado, o *handoff* é talvez a operação mais sofisticada em sistemas móveis, pois permite a continuidade da comunicação mesmo na mudança entre células. Para sistemas com multiplexação em frequência ou tempo, embora complexa, esta operação não afeta muito fortemente o planejamento. Porém, em sistemas CDMA, a operação de *soft handoff* se reveste de uma grande importância, com influência direta não somente na continuidade da comunicação, sem queda da chamada, mas também na qualidade do sistema.

Embora a técnica CDMA já tenha mais de 10 anos, ainda existem importantes questões em aberto que necessitam de melhor tratamento. Uma destas questões é uma adequada estratégia de planejamento que permita, de forma eficiente e prática, levar em consideração a operação de *soft handoff*, onde um usuário utiliza mais recurso que um mínimo necessário.

O presente trabalho apresentou uma contribuição neste sentido, apresentando uma técnica de planejamento onde são introduzidos novos elementos que permitem avaliar, com mais subsídios, as condições em que ocorre o processo de *soft handoff*. Como era de se esperar, esta técnica procura utilizar as técnicas já desenvolvidas para o planejamento de sistemas CDMA, acrescentando novas possibilidades, no sentido de possibilitar um planejamento que atenda a novas características.

Neste capítulo são apresentadas as possíveis evoluções do presente trabalho, no sentido de aplicar a técnica proposta em conjunto com outros parâmetros do sistema e, também, em condições reais de planejamento e verificação da condição de operação do sistema. O capítulo se encerra com um apanhado geral sobre o trabalho, onde se procura analisar o atendimento dos objetivos propostos pelo trabalho.

## **7.2 Evolução do trabalho**

Uma evolução natural do trabalho é a consideração de outros parâmetros do sistema, como, por exemplo, os parâmetros de RF, em conjunto com a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* e a probabilidade de *outage*. Com esta utilização conjunta, tem-se uma ferramenta com mais poder para realizar o planejamento de forma mais precisa. O tratamento de todos estes parâmetros requererá uma ferramenta de análise que permita verificar a interação entre os diversos parâmetros, no sentido de atender às metas de qualidades exigidas.

Outra evolução é no sentido de sua aplicação em células com áreas e tráfego diferentes, refletindo a condição real. Para esta evolução, será necessário acrescentar na

metodologia, características de ajustes que permitam adequar os resultados obtidos aos cenários heterogêneos encontrados na prática. Esta tarefa já se aproxima bastante de um uso prático, onde são utilizados parâmetros com características diferentes, dependendo da implementação do sistema. Sendo assim, esta evolução estará vinculada a peculiaridades das diversas implementações de sistemas CDMA.

A técnica de acesso CDMA caracteriza-se como aquela que permite maior eficiência no uso do espectro, sendo, portanto, muito conveniente sua utilização em sistemas móveis. Esta afirmação se confirma quando se verifica que, para sistemas móveis avançados, como os sistemas de terceira geração, a proposta que se destaca tem como interface aérea um sistema com técnica CDMA, chamada de WCDMA (*Wideband CDMA*) [13]. Portanto, a técnica de planejamento proposta neste trabalho encontra aplicação, também, para tais sistemas avançados, uma vez que pode ser aplicada integralmente no planejamento destes sistemas, adequando-se a novas características, introduzidas por estes sistemas. Embora estes sistemas permitam taxas de dados mais altas, com novas características, a operação de *soft handoff* permanece a mesma, necessitando que se leve em consideração, no planejamento, a condição em que um móvel na região de sobreposição ocupa mais recurso que um mínimo necessário.

Outro campo possível de utilização da estratégia proposta é em estruturas hierárquicas de células (HCS - *hierarchical cellular structures*) [20]. O HCS consiste de duas ou mais camadas de células, onde a camada com pequenas células é a mais baixa. Esta estrutura pode ser formada por camadas de pico- e micro-células, sendo a primeira para atender a ambientes interiores e, a segunda, para atendimento tanto de interiores quanto de exteriores, com certos limites de mobilidade. Estas duas camadas podem estar juntas com uma camada de macro-células para atendimento externo de áreas maiores, que atenderia à alta mobilidade. Finalmente, pode existir uma mega-célula que seria a camada mais alta, por exemplo, empregando satélite. Os sistemas móveis avançados utilizarão este tipo de estrutura, no sentido de uma utilização mais eficiente do espectro alocado. O uso eficiente do espectro aumentará o número de usuários que podem ser atendidos pelo sistema e, conseqüentemente, aumentarão o número de chamadas que serão atendidas

satisfatoriamente, sem interrupção. Outro impacto esperado relaciona-se ao custo do sistema, com um potencial de redução do número de estações base numa certa região geográfica. A técnica proposta por este trabalho pode ser aplicada como subsídio para implementação do HCS.

### **7.3 Conclusão**

A proposta do presente trabalho foi atingida com êxito, uma vez que o objetivo era o de apresentar uma nova metodologia de planejamento que fosse de fácil aplicação e com forte impacto no subsídio ao planejamento. A seguir, faz-se uma apresentação do desenvolvimento do trabalho onde se destacam pontos importantes.

O trabalho teve, como ponto de partida, a análise das metodologias utilizadas atualmente no planejamento de sistemas CDMA, nas quais foram identificados os pontos de deficiência e os pontos de valor para serem utilizados como subsídios para o trabalho. Um outro ponto interessante das metodologias comumente utilizadas relaciona-se à inexistência de consideração sobre a probabilidade de bloqueio de *soft handoff* como elemento de planejamento.

A seguir, explorou-se o arranjo de duas células, onde foram desenvolvidas as expressões e conceitos necessários para formular uma nova metodologia de planejamento. Embora, se por um lado, o arranjo de duas células não tenha uma aplicação prática, por outro, o tratamento dos problemas envolvidos na operação de *soft handoff* neste arranjo são mais facilmente tratados, por existir somente uma região de sobreposição entre células. Destaca-se, como ponto fundamental no trabalho, a determinação da probabilidade de atividade de canal na região de sobreposição. Esta probabilidade forma a base para o cálculo de todas as outras probabilidades. Outro ponto a se destacar é a utilização da distribuição *Binomial*, ao invés da distribuição de *Erlang-B*, para representar o comportamento de atividade de canais nas células geradoras de tráfego de *soft handoff*, sem prejuízo significativo nos resultados. A utilização desta distribuição permite uma grande redução do tempo de cálculo das probabilidades; principalmente para o arranjo de três

células, é crucial a eficiência no tempo de cálculo. Utilizando os resultados desenvolvidos, foram derivadas todas as expressões necessárias para o cálculo das probabilidades de bloqueio de *soft handoff* e *outage*, passando pela probabilidade de excesso. A determinação destas probabilidades fecha a parte de formulação dos novos parâmetros utilizados na metodologia de planejamento proposta.

Após completar o trabalho para o arranjo de duas células, partiu-se para o arranjo de três células, onde foi feita uma generalização para este caso, utilizando todo o procedimento adotado para o arranjo de duas células. Para o arranjo de três células, surge a região de sobreposição entre três células que aumenta a complexidade da análise realizada. É interessante ressaltar a complexidade das expressões obtidas, quando se compara com o arranjo de duas células. Esta complexidade adicional forçou a utilização de uma linguagem de programação mais poderosa do ponto de vista de eficiência no tempo de cálculo das probabilidades.

Tendo sido obtidas todas as expressões para o cálculo das probabilidades propostas, partiu-se para a obtenção dos resultados no Capítulo 5. Para isto, foram utilizadas três estratégias de alocação de canais. A primeira considera uma condição onde se acrescentam canais alocados na célula para cursar o tráfego de *soft handoff*. Embora seja uma forma de abordar o problema, a utilização desta técnica teve por objetivo criar um cenário de análise. A segunda técnica assemelha-se às técnicas comumente utilizadas no planejamento de sistemas CDMA. Nesta técnica, é feita simplesmente a reserva de canais para atender ao tráfego de *soft handoff*. Embora seja bastante simples, esta técnica tem um impacto na diminuição da capacidade do sistema. A terceira técnica de alocação apresenta a proposta de planejamento onde são adicionados canais na célula e são reservados canais para o tráfego de *soft handoff*. A rigor, as duas primeiras técnicas de alocação são casos particulares desta terceira técnica.

Após a apresentação das estratégias de alocação, foram obtidos os resultados para os arranjos de duas e três células. Os resultados para duas células foram utilizados como referência de comportamento para análise do arranjo de três células. A obtenção dos

resultados caracterizou-se pela obtenção de uma série de gráficos que demonstram o comportamento das probabilidades. Num planejamento prático, estes gráficos são substituídos por algoritmos de planejamento. Porém, para demonstração do método de planejamento proposto, os gráficos foram utilizados para obtenção dos valores das probabilidades no processo de planejamento.

A parte final do trabalho foi um exercício de planejamento. Foi necessário arbitrar valores para as probabilidades em questão. Um dos pontos críticos na aplicação de uma nova técnica é a evidente falta de referencial para estabelecer valores para os parâmetros. Ficou claro que os valores, que no exercício de planejamento foram arbitrados, devem ser especificados levando-se em consideração requisitos do sistema. Somente com o tempo de uso destes novos elementos de planejamento é que será possível consolidar valores práticos. No exercício realizado, foram exploradas várias possibilidades de planejamento. Partiu-se, primeiramente, para a aplicação das duas primeiras estratégias de alocação, mostrando que o resultado não era satisfatório, não conseguindo, assim, atingir os valores especificados. A seguir, foi utilizada a terceira estratégia de alocação, onde se obteve um resultado satisfatório no atendimento dos requisitos pré-definidos. Com isto, ficou demonstrada a estratégia proposta neste trabalho e sua eficiência como uma nova técnica de planejamento.

Espera-se que este trabalho possa contribuir, de forma efetiva, na aplicação desta nova metodologia no planejamento de sistemas CDMA, permitindo com isto obter melhor desempenho na sua operação.

## 8 Referências Bibliográficas

- [1] YANG, Samuel C. *CDMA RF System Engineering*. Boston : Artech House, 1998. 280 p.
- [2] GARG, Vijay, SMOLIK, Kenneth, WILKES, Joseph E. *Applications of CDMA in Wireless/Personal Communications*. Upper Saddle River : Prentice Hall , 1997. 360 p.
- [3] VITERBI, Adrew J. *Principles of Spread Spectrum Communication*. Massachusetts : Addison-Wesley Publishing Company, 1995. 245 p.
- [4] TIA/EIA IS-95A. *Mobile Station-Base Station Compatibility Standard for Dual-Mode Wideband Spread Spectrum Cellular System*. Telecommunication Industry Association.
- [5] GOODMAN, David J. *Wireless Personal Communications System*. Massachusetts : Addison-Wesley, 1997. 417 p.
- [6] OJANPERÄ, Tero, PRASAD, Ranjee. *Wideband CDMA for Third Generation Mobile Communications*. Boston : Artech House, 1998. 433 p.
- [7] BRANQUINHO, Omar C., LEVI, Lucia, MURATORE, Flavio, PALESTINI, Valério, ROMANO, Giovanni. *Implementation of RAKE Receiver in the Simulation Program CDMASIM and First Performance Results*. Rapporto Técnico. Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni. Torino, 7 gennaio 1993.
- [8] TIA/EIA IS-95B. *Mobile Station-Base Station Compatibility Standard for Dual-Mode Wideband Spread Spectrum Cellular System*. Telecommunication Industry Association.

- [9] Guedes, L. G. R., Yacoub M. D., *Sobreposição entre células com restrição de cobertura*, Journal of Microwaves and Optoelectronics, vol. 1, n° 1, pp. 10-29, Maio 1997.
- [10] ----, *Boundaries between cells in Nakagami fading conditions*, SBT/IEEE International Telecommunications Symposium, ITS94, Rio de Janeiro, August 94.
- [11] ----, *Overlapping cell areas in different fading conditions*. 45<sup>th</sup> IEEE Vehicular Technology Conference, VTC95, Chicago, Illinois, Julho 1995.
- [12] ----, *Overlapping area between three cells*. SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. Natal, R.G. Norte, Agosto de 1997.
- [13] HOLMA, Harri, TOSKALA, Antti. *WCDMA for UMTS – Radio Access for Third Generation Mobile Communications*. New York : John Wiley & Sons, 2000. 322 p.
- [14] YACOUB, Michel D. *Foundations of Mobile Radio Engineering*. CRC, Boca Raton. 1993. 481 p.
- [15] BRANQUINHO, Omar C., YACOUB, Michel D. *Dimensionamento de Canais de Soft Handoff em Sistemas CDMA*. XVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 1999. Vila Velha – ES.
- [16] BRANQUINHO, Omar C., YACOUB, Michel D. *Generalização de Método para Dimensionamento de Canais de Soft Handoff em Sistemas CDMA*. XVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2000. Gramado – RS.
- [17] BRANQUINHO, Omar C., YACOUB, Michel D. *Dimensionamento de Canais de Soft Handoff em Sistemas CDMA*. Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações, Volume 16, Número 1, pp 1-10, Junho 2001. ISSN 0102-986X

- [18] PAPOULIS, Athanasios. *Probability & Statistics*. New Jersey : Prentice Hall, 1990. 454 p.
- [19] PAPOULIS, Athanasios, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, New Jersey : McGraw-Hill, 1984. 576 p.
- [20] GUERRERO, Lauro Ortigoza, AGHVAMI, A. Hamid. *Resource Allocation in Hierarchical Cellular Systems*. Boston : Artech House, 2000, 208 p.