

Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Elétrica

Este exemplar corresponde à redação final d.
defendida por Adilson Fernando
VICTORIA e aprovada pela Com
Julgadora em 02/193.


Orientador

**Interferência de Canal Adjacente como Função dos
Parâmetros de Propagação e Distribuição de Tráfego em
Sistemas Rádio Móveis Celulares**

orientando

Adilson Fernando [Victoria n°/666

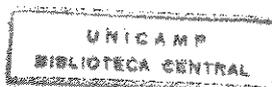
orientador

Michel Daoud [Yacoub *

Tese apresentada na Faculdade de Engenharia Elétrica,
Departamento de Comunicações, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Campinas, Fevereiro de 1993.

- i -



Resumo

Este trabalho apresenta o estudo em bases estatísticas da interferência de canal adjacente como função dos parâmetros de propagação e distribuição de tráfego em sistemas rádio móveis celulares.

Neste estudo, considera-se a indefinição entre as fronteiras de células vizinhas, com a existência de áreas de sobreposição determinadas pelos parâmetros de propagação, onde unidades móveis podem experimentar comunicações adequadas com mais de uma estação rádio base. Este fato permite a aplicação de técnicas de encaminhamento alternativo sobre o tráfego gerado nestas áreas de sobreposição, o que resulta em um melhor desempenho de tráfego do sistema, ou seja, um melhor grau de serviço.

No entanto, como as técnicas de encaminhamento alternativo modificam a distribuição das taxas de ocupação dos canais, causando uma concentração destes nas áreas fronteiriças das células, tem-se a contrapartida do aumento do níveis de interferências presentes no sistema.

Este é um fato relevante, pois na tentativa de se melhorar o grau de serviço do sistema pode ocorrer a degradação da qualidade de transmissão para além de um nível aceitável, sendo possível tornar inviável a operação deste sistema.

A probabilidade de interferência de canal adjacente é estudada sob os pontos de vistas da estação rádio base e da unidade móvel, considerando-se os ambientes rádio móveis com desvanecimentos caracterizados pelas distribuições Log-Normal ou Rayleigh, em conjunto com a aplicação de técnicas de encaminhamento alternativo sobre o tráfego considerado flexível.

Agracedimentos

Agradeço ao Prof. Michel Yacoub a oportunidade e o incentivo para o desenvolvimento deste trabalho. Minha gratidão também aos amigos e colegas do CPqD - Telebrás pelo apoio oferecido.

Índice

1.0 - Introdução.....	1
1.1 - Um Breve Histórico sobre Comunicações móveis	1
1.2 - Sistema Móvel Celular.....	2
1.2.1 - Elementos Básicos do Sistema.....	2
1.2.2 - Considerações de Projeto de Sistemas Móveis Celulares.....	3
1.2.3 - Técnicas de Expansão de Sistemas.....	4
1.2.4 - Sistemas Móveis de Segunda Geração.....	4
1.2.5 - Técnicas de Melhoria de Desempenho de Tráfego.....	5
1.3 - Interferência de Canal Adjacente sob Um Novo Aspecto.....	5
1.4 - Plano de Trabalho da Tese.....	6
2.0 - Áreas de Cobertura e Sobreposição em Sistemas Celulares	8
2.1 - Características do Canal Rádio Móvel.....	8
2.1.1 - Perdas de Percurso.....	8
2.1.2 - Sombreamento ou Desvanecimento de Longo Prazo.....	9
2.1.3 - Desvanecimento de Curto Prazo ou de Rayleigh.....	9
2.2 - Determinação da Área de Cobertura de uma Célula.....	10
2.2.1 - Área de Cobertura para Ambiente Log-Normal.....	11
2.2.2 - Área de Cobertura para Ambiente Rayleigh.....	11
2.3 - Áreas de Sobreposição entre as Fronteiras das Células.....	13
2.3.1 - Proporção de Tráfego com Acesso à Dois Caminhos.....	14
2.3.1.1 - Distribuição Conjunta de Dois Sinais Rayleigh.....	14
2.3.1.2 - Distribuição Conjunta de Dois Sinais Log-Normais.....	14
2.3.1.3 - Distribuição Geográfica da Razão entre Potências Médias.....	15
2.3.1.4 - Distribuição Geográfica da Razão entre Potências Instantâneas.....	16

2.4 - Proporção de Tráfego com Acesso à Três Caminhos.....	20
2.5 - Sumário e Conclusões.....	21
3.0 - Técnicas de Encaminhamento Alternativo.....	23
3.1 - Estratégias de Encaminhamento Alternativo.....	23
3.2 - Processos de Markov.....	24
3.2.1 - Modelo do Processo de Markov para Uma Célula.....	25
3.2.2 - Processos de Markov para Duas ou Três Células.....	25
3.3 - Encaminhamento Alternativo para Duas Células Adjacentes.....	27
3.3.1 - Parâmetros de Tráfego.....	27
3.3.2 - Densidades de Probabilidade de Transição.....	28
3.3.3 - Medidas de Desempenho.....	29
3.4 - Encaminhamento Alternativo para Três Células Adjacentes.....	30
3.4.1 - Parâmetros de Tráfego.....	30
3.4.2 - Densidades de Probabilidade de Transição.....	31
3.4.3 - Medidas de Desempenho.....	32
3.5 - Desempenho em Presença de Encaminhamento Alternativo.....	33
3.6 - Sumário e Conclusões.....	36
4.0 - Interferência de Canal Adjacente.....	37
4.1 - Interferência de Canal Adjacente em Sistemas Celulares.....	37
4.1.1 - Interferência de Canal Adjacente Intra-célula.....	39
4.1.2 - Interferência de Canal Adjacente Inter-célula.....	39
4.2 - Probabilidade de ICA Inter-celular.....	40
4.2.1 - Interferência de Canal Adjacente sobre a Unidade Móvel.....	41
4.2.1.1 - Um Canal Adjacente Ativo.....	41
4.2.1.2 - Dois Canais Adjacentes Ativos.....	43
4.2.2 - Interferência de Canal Adjacente sobre a ERB.....	43
4.2.2.1 - Um Canal Adjacente Ativo.....	44

4.2.2.2 - Dois Canais Adjacentes Ativos.....	45
4.3 - Relações entre a Probabilidade de ICA e os Parâmetros de Propagação.....	46
4.4 - Relações entre a Probabilidade de ICA e a Distribuição de Tráfego.....	48
4.5 - Técnicas de Encaminhamento Alternativo e a Probabilidade de ICA.....	50
4.6 - Sumário e Conclusões.....	51
5.0 - Resultados.....	52
5.1 - Considerações Gerais para Simulação.....	52
5.2 - Cálculo da Área de Cobertura da Célula.....	54
5.3 - Cálculo da Proporção de Áreas de Sobreposição.....	54
5.4 - Aplicação de Técnicas de Encaminhamento Alternativo.....	57
5.5 - Probabilidade de Um ou Dois Canais Adjacentes Ativos e Índice de Adjacência.....	59
5.6 - Cálculo da Probabilidade de ICA.....	64
5.6.1- Probabilidade de ICA sobre a ERB.....	65
5.6.2 - Probabilidade de ICA sobre a Unidade Móvel.....	71
5.7 - Sumário e Conclusões.....	77
6.0 - Conclusões	78
6.1 - Conclusões Principais sobre a Interferência de Canal Adjacente.....	80
6.1.1- Probabilidade de 1 e 2 Canais Adjacentes Ativos e Índice de adjacência.....	80
6.1.2 - Probabilidade de ICA sobre a ERB.....	80
6.1.3 - Probabilidade de ICA sobre a Unidade Móvel.....	80
6.2 - Conclusões Finais.....	81
6.3 - Trabalhos Futuros.....	81
Referências.....	83

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos gerais sobre sistemas rádio móveis celulares, com transmissão em banda estreita, para melhor compreender a motivação do estudo da influência dos parâmetros de transmissão e distribuição de tráfego sobre a probabilidade de interferência de canal adjacente, abordada sob um novo aspecto.

1.1-Um Breve Histórico sobre Comunicações Móveis.

O conceito de comunicações móveis via rádio começou a ser pensado junto com o surgimento do próprio rádio. Este conceito foi utilizado durante este século em vários serviços de comunicações, como : serviços de segurança pública, navegação, equipamentos militares portáteis, sistemas convencionais de telefonia móvel, etc.

A real necessidade de sistemas de comunicações, que ofereçam mobilidade total, possibilidade de comunicação com outras unidade móveis e sistemas fixos, tem sido debatida e analisada por vários autores [1,2,3,4,5,6]. Os primeiros sistemas de comunicações móveis, os *sistemas convencionais*, a despeito dos problemas tecnológicos característicos individuais, possuíam uma deficiência básica comum : a escassa oferta de canais de comunicação para os possíveis usuários dos serviços. Não obstante, os sistemas de telefonia móveis convencionais experimentaram, durante algumas décadas, uma certa evolução tecnológica. Esta evolução se refere a aspectos como miniaturização e integração de componentes, diminuição do consumo de potência dos equipamentos, desenvolvimento de melhores técnicas de modulação, etc. Contudo, a expansão dos sistemas, com conseqüente aumento do número de usuários, sempre esbarrou na limitação inerente do pequeno número de canais disponíveis.

Estes sistemas móveis convencionais se caracterizavam por:

- Grande área de cobertura.
- Antenas em pontos elevados .
- Alta potência de transmissão.
- Baixa densidade de usuários.

Por ter alta potência de transmissão e grande área de cobertura, as frequências dos canais não podiam ser reutilizadas a pequenas distâncias, devido as interferências entre os canais de mesma frequência (cocanal).

Portanto, para se expandir o número de canais do sistema era necessária a alocação de parcelas cada vez maiores do espectro de frequência disponível. Mas a alocação de espectro para algum tipo de serviço é rigorosamente controlada por órgãos governamentais e internacionais, sendo um processo trabalhoso e difícil a alteração das regulamentações em vigor, passando algumas vezes estas questões do aspecto técnico para o político.

Na década de 70 surge um novo sistema de telefonia móvel. Este sistema é baseado na idéia de se dividir a área a ser atendida em áreas menores (*céulas*), com padrões definidos. Em cada uma destas sub-áreas haveria uma estação rádio, com a função de transmissão e recepção dos canais de comunicação, utilizando uma potência bem menor comparada àquela dos sistemas convencionais.

Se a área de cobertura e a potência são menores, a distância mínima para reutilização das frequências, com um nível de interferência aceitável, também diminui. O número de canais e usuários atendidos dentro da área inicial pode se multiplicar por um grande fator, tornando viável a expansão modular dos sistemas. Assim, a partir destas idéias simples, iniciou-se uma das maiores revoluções tecnológicas e econômicas na história das telecomunicações, ou seja, a *telefonia móvel celular* e todos os outros serviços derivados ou baseados.

1.2- Sistema Móvel Celular.

1.2.1-Elementos Básicos do sistema.

Podemos considerar o sistema móvel celular, constituído por três elementos básicos (Figura 1.1) :

- A unidade móvel (UM)
- A estação rádio base (ERB)
- A Central de Comutação Celular (CCC).

A unidade móvel possibilita o acesso do usuário móvel ao sistema. A estação rádio base têm por função a interface rádio entre a unidade móvel e a CCC, além de desempenhar algumas funções de controle. A Central de Comutação Celular desempenha as funções de uma central digital convencional classe 5, além das funções relativas ao tratamento (monitoração e controle) do canal de rádio ("paging", "locating", "handoff", "roaming", etc) . Também ela se comunica com as centrais de comutação públicas (CCP), constituindo-se num meio de acesso entre o sistema móvel celular e o sistema fixo.

Maiores informações sobre o funcionamento destes elementos básicos do sistema e outros como controle e sinalização, inicialização, atendimento de chamadas, etc, podem ser encontradas detalhadamente nas referências [2,3,5,6].

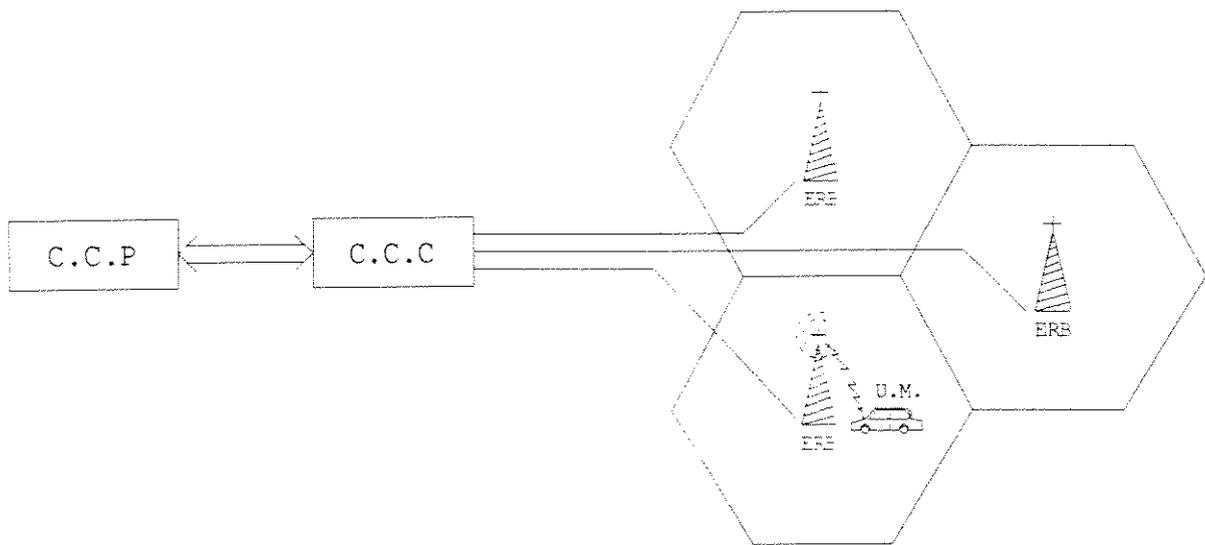


Fig. 1.1

1.2.2-Considerações de Projeto de Sistemas Móveis Celulares.

Para se implementar um sistema móvel celular existem alguns parâmetros e estudos sistêmicos que devemos especificar:

- Projeto de rádio e propagação para a área de serviço a ser implantada.
- Planejamento da matriz de canais, levando-se em conta as distâncias mínimas de reuso das frequências, dado a largura de faixa e o número de canais por célula do "cluster".
- Técnicas de modulação a serem empregadas, para se obter uma melhor utilização do espectro disponível, mas levando-se em conta os custos do equipamento para o usuário.
- Estrutura dos canais de sinalização e voz.
- Projeto do sistema de comutação.
- Estudo de teletráfego.
- Projeto de software para os serviços oferecidos pelo sistema.

Observaram-se nas últimas duas décadas, principalmente nos anos 80, duas tendências indiscutíveis. A primeira, a rapidez extraordinária no avanço tecnológico em componentes e equipamentos para sistemas de telefonia celular. A segunda, a rapidez com que estes sistemas chegaram à saturação, com o aumento explosivo do número de usuários interessados nos serviços de rádio móvel.

Este aumento de demanda por sistemas celulares ocorreu pela procura dos serviços oferecidos e mobilidade. Estas qualidades atraíram profissionais, principalmente executivos, que descobriram na comunicação móvel uma maneira eficiente de aproveitar seu tempo de trânsito,

normalmente dispendido com atividades não ligadas aos negócios. Com o crescimento do número de usuários, e decorrente rateamento e barateamento dos terminais e serviços, mais pessoas procuraram os serviços móveis. Assim os sistemas necessitavam de expansão, com várias técnicas sendo utilizadas.

1.2.3-Técnicas de Expansão de Sistema.

As técnicas mais conhecidas de expansão de sistemas são:

- **Adicionar canais** - nem sempre viável devido à escassez de espectro disponível.
- **Empréstimo de canais de uma célula vizinha** - solução paliativa até que esta célula volte a necessitar do canal cedido.
- **Mudança do padrão de "cluster"** - sistemicamente complicada.
- **Divisão de células** - desaconselhada pelo aumento de ERB's do sistema.
- **Setorização das células** - utilizando antenas direcionais.

Estas técnicas estão detalhadas nas referências [1,2,3,4,5 e 6], sendo a mais utilizada a da setorização, por ser a mais viável economicamente. Mesmo fazendo uso destas técnicas, os sistemas continuaram a atingir a saturação rapidamente. Esta saturação significa a degradação da qualidade ou grau de serviço do sistema, ou seja, a quantidade de chamadas bloqueadas aumenta além de um limiar estabelecido como de qualidade aceitável. Da mesma forma, a qualidade da transmissão diminui, traduzida na relação portadora/sinal interferente.

A contínua necessidade de aumento da capacidade leva ao futuro advento da segunda geração de sistemas móveis celulares.

1.2.4 - Sistemas Móveis de Segunda Geração

Esta geração utilizará técnicas digitais para modulação ($\pi / 4$ -DQPSK, GMSK, etc), processamento de banda base (codificadores de voz, equalizadores adaptativos, etc), sistemas de acesso inteligentes (TDMA, ETDMA, CDMA, etc), oferecendo vantagens como : alta qualidade subjetiva de voz, baixo custo de infraestrutura, flexibilidade e habilidade de fornecer novos serviços (FAX, RDSI, etc.).

A transição do sistema analógico para o digital é complicada. Durante esta transição, existirá um período de convivência entre os dois sistemas. Inicialmente o espectro de frequências alocado para o sistema analógico será compartilhado com o futuro sistema digital. Caso o atual usuário do sistema de primeira geração não se adapte à utilização de terminais duais, ele irá experimentar uma degradação da qualidade do serviço oferecido, pois, o número de canais oferecidos a este usuário do sistema analógico será reduzido. Isto vale para os Estados Unidos, onde já existe um grande número de usuários atendidos pelo sistema analógico, e usuários de outros países que optem pelos mesmos sistemas, como no Brasil.

Contudo, os usuários com terminais de modo de operação dual terão uma grande melhoria na qualidade de serviço. Os sistemas digitais de telefonia celular propostos apresentam uma melhor utilização do espectro, oferecendo um ganho teórico aproximado de 5 a 20 vezes no número de usuários em relação ao analógico, mantendo-se constante o número de células. Mas uma pergunta que muitos administradores de sistemas celulares se fazem é se o atual usuário estaria disposto a pagar mais por um serviço que já utiliza, tendo de trocar de equipamentos.

No sistema europeu (GSM) não ocorrerão tais problemas na transição do sistema analógico para o digital, pois estes utilizarão diferentes faixas de frequências de operação, não havendo comprometimento da eficiência do atual sistema celular analógico europeu.

1.2.5-Técnicas de Melhoria de Desempenho de Tráfego.

Estas técnicas baseiam-se em algoritmos de alocação de canais, e as principais são:

- **Alocação Fixa** - canais alocados conforme perfil de tráfego da região, sendo esta alocação fixa.
- **Alocação Dinâmica** - canais alocados de acordo com a demanda dinâmica dos assinantes. Indicada para distribuições não uniformes e variáveis de tráfego.
- **Alocação Híbrida** - uma mistura das duas primeiras, onde parte dos canais é fixa e parte dinâmica, distribuídas de acordo com o tráfego.
- **Alocação por Empréstimo** - empréstimo de canais de células vizinhas.
- **Alocação por Técnicas de Encaminhamento Alternativo** - onde o tráfego nas fronteiras das células utilizam estratégias de encaminhamento alternativo.

Esta última técnica utiliza o conceito no qual as bordas entre as células são indefinidas, havendo uma área de sobreposição nas fronteiras. O tráfego gerado dentro desta área de sobreposição pode ser desviado de uma célula para outra, convenientemente, a fim de se diminuir a probabilidade de bloqueio médio do sistema.

Por outro lado, a sobreposição entre as áreas de cobertura de células vizinhas incrementam as interferências e intermodulações presentes no sistema. Assim há um encrudecimento das interferências de cocanal e canal adjacente, sendo esta última o objeto de estudo da tese.

1.3 Interferência de Canal Adjacente Sob Um Outro Aspecto.

O formato hexagonal das células no sistema de rádio móvel é considerado como um modelo ideal. Na prática, as células não são bem definidas e possuem áreas de sobreposição nas fronteiras, onde o tráfego gerado pode ter acesso a mais de uma estação rádio base.

Estudos teóricos rigorosos [6,9] mostram que estas áreas de sobreposição são bastante significativas representando mais de 40 % da área da célula. O tráfego gerado nestas áreas de sobreposição pode ser tratado por técnicas de encaminhamento alternativo, proporcionando um

decréscimo substancial na probabilidade de bloqueio médio do sistema. Se, por um lado, o bloqueio médio diminui, por outro lado, o nível de interferência de sinal aumenta. Isto é válido tanto para os cocanais quanto para os canais adjacentes.

O aumento da interferência de cocanal é óbvia, pois conforme se permite um relativo aumento da área de cobertura da célula, a distância mínima de reuso de frequências especificada no projeto não é mais respeitada. Este, de fato, constitui um outro estudo apresentado em [37].

Interferência de Canal Adjacente.

A interferência de canal adjacente ocorre pela utilização de canais adjacentes em uma mesma célula ou células vizinhas. Na realidade, um canal ativo em rádio frequência, principalmente em sistemas de banda estreita, não concentra toda a energia transmitida dentro da faixa de frequências alocada. Isto ocorre devido a limitação física dos equipamentos utilizados. Assim componentes residuais em frequência estarão presentes justamente sobre os canais laterais ao canal transmitido, atuando como interferência ou ruído.

A interferência de canal adjacente, como apresentada neste trabalho de tese, será vista sobre um outro aspecto. Admite-se que tanto os parâmetros do sistema quanto os equipamentos não são modificados, caracterizando uma *interferência de canal adjacente residual*, igual àquela especificada inicialmente no projeto de sistema.

No entanto, o uso de técnicas de encaminhamento de tráfego alternativo modifica a distribuição das taxas de ocupação dos canais, provocando uma concentração destes na fronteira entre células. Conseqüentemente, a interferência de canal adjacente residual sofrerá um acréscimo, tanto maior quanto maior a concentração de canais nas fronteiras.

Propõe-se neste trabalho o estudo da probabilidade de interferência de canal adjacente em função do uso de técnicas de encaminhamento de tráfego alternativo. Esta probabilidade dará uma idéia qualitativa de quanto a interferência será influenciada pelo uso de algoritmos alternativos de alocação de canais.

1.4 Plano de Trabalho da Tese

A interferência de canal adjacente será estudada numa base estatística como função de parâmetros de propagação e da distribuição de tráfego, levando-se em conta o fato das sobreposições das áreas fronteiriças das células e o uso de técnicas de encaminhamento alternativo. Não serão considerados os aspectos de modulação, seletividade de filtros de transmissão e recepção ou ainda relações sinal/ruído. Serão realizadas simulações envolvendo vários parâmetros de interesse para a nossa tese, sendo os resultados destas simulações plotados em diversas curvas para observações e conclusões. A tese contém seis capítulos, brevemente descritos a seguir.

No Capítulo 2 são definidas as áreas de cobertura de cada célula para ambientes com desvanecimento tipo Log-Normal e Rayleigh, e são determinadas as áreas de sobreposição entre células vizinhas. São apresentados alguns fenômenos presentes no canal de rádio móvel, e

No Capítulo 3 são estudadas as estratégias de encaminhamento alternativo do tráfego gerado pelos usuários nas regiões fronteiriças de sobreposição entre células.

No Capítulo 4, apresentamos o estudo estatístico da Interferência de Canal Adjacente como função de parâmetros de propagação e distribuição de tráfego, levando-se em conta a sobreposição das fronteiras das células adjacentes e a utilização das técnicas de encaminhamento alternativo, descritas nos Capítulos 2 e 3.

No capítulo 5 são apresentados os resultados e comentários dos efeitos de vários parâmetros de propagação e tráfego sobre a probabilidade de Interferência de Canal Adjacente, tanto sobre a unidade móvel quanto sobre a estação rádio base.

No capítulo 6 são apresentados os comentários finais e conclusões obtidas durante a realização da tese.

CAPÍTULO 2

ÁREAS DE COBERTURA E SOBREPOSIÇÃO EM SISTEMAS CELULARES

Neste capítulo determinam-se a área de cobertura de uma célula e as áreas de sobreposição entre células vizinhas. Para tanto, apresentam-se as principais características de propagação do canal de rádio móvel, onde são definidos os fenômenos de perdas de percurso, sombreamento e multipercurso. Veremos que as áreas de sobreposição, bem como a área de cobertura de cada célula, dependem das características do canal rádio móvel.

2.1- Características do Canal de Rádio Móvel

O canal de rádio móvel é um meio extremamente complexo onde três fenômenos distintos podem interagir : perdas de percurso, desvanecimento de longo prazo e desvanecimento de curto prazo.

A perda de percurso refere-se à atenuação do sinal recebido devido ao distanciamento entre o transmissor e o receptor. O desvanecimento de longo prazo está ligado diretamente ao efeito de sombreamento do sinal transmitido, o qual ocorre devido a grandes obstáculos naturais e artificiais no caminho de propagação. Estas perdas provocam variações lentas no sinal recebido. Por outro lado, o desvanecimento de curto prazo está ligado ao efeito de propagação de multipercurso do sinal transmitido. O multipercurso ocorre devido às múltiplas reflexões em obstáculos no caminho propagado. Estes obstáculos estão relativamente próximos ao receptor do sinal e são característicos dos ambientes urbanos. Neste caso, ocorrem variações rápidas no sinal recebido.

Os fenômenos de desvanecimento de longo e curto prazo necessitam ser estudados com base nas distribuições estatísticas do sinal de rádio móvel, como será visto mais adiante neste capítulo.

2.1.1- Perdas de Percurso.

As perdas de percurso dependem basicamente do ambiente de propagação . Estas perdas podem ser modeladas em alguns ambientes distintos, descritos mais detalhadamente nas referências [1, 2, 3,4,5,6]. Podemos citar as perdas por propagação em espaço livre, perdas por propagação em terreno plano, perdas por difração em terreno do tipo gume de faca, etc. Existem

na literatura [3,4,13,14,15,16] vários modelos para o cálculo das perdas de percurso em sistemas de rádio móvel. Citam-se, por exemplo, os modelos de Egli, Blomquist-Ladell, Longley-Rice, Okumura-Hata, Lee, etc. Estes modelos são, em geral, complexos, requerendo o conhecimento, às vezes detalhado, da topografia do terreno.

Neste nosso estudo, considera-se que o sinal recebido varia segundo $d^{-\alpha}$, onde α é o coeficiente de perda de percurso ($3.0 \leq \alpha \leq 4.0$) e d é a distância entre transmissor e receptor.

2.1.2- Sombreamento ou Desvanecimento de Longo Prazo.

Este tipo de desvanecimento também é conhecido como de "longo termo", "lento" e ainda "Log-Normal". Este tipo de desvanecimento é responsável por flutuações lentas no nível do sinal de recepção, sendo claramente um fenômeno de sombreamento do sinal rádio por obstáculos presentes no caminho de propagação.

Se imaginarmos que o sinal de rádio móvel percorre infinitos obstáculos dentro de uma área de cobertura, poderemos considerar as constantes de atenuação de cada obstáculo, suas espessuras e conseqüentemente as resultantes amplitudes do sinal após os mesmos como variáveis aleatórias.

Mostra-se que [11,17] o envelope R em dB do sinal recebido com desvanecimento de longo prazo tem uma distribuição Gaussiana. A densidade $p(R)$ de R é dada por :

$$p(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{R - M_R}{\sigma_R}\right)^2\right] \quad (2.1)$$

onde M_R é a média e σ_R é o desvio padrão, dados em dB. Na prática determinou-se que o desvio padrão varia entre 4 e 12 dB.

2.1.3.- Desvanecimento de Curto Prazo ou de Rayleigh.

Este tipo de desvanecimento é conhecido também por perda de "curto termo" ou "desvanecimento rápido". Como dissemos anteriormente, o desvanecimento de curto prazo é responsável por flutuações rápidas e profundas no sinal recebido. Se considerarmos que o sinal sofre múltiplas reflexões que alteram aleatoriamente a amplitude e a fase do sinal, os sinais refletidos quando se compõem na recepção o fazem construtiva ou destrutivamente, ocasionando assim flutuações rápidas. A envoltória r do sinal recebido apresentará uma distribuição de Rayleigh com densidade $p(r)$ dada por :

$$p(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right] \quad (2.2)$$

onde $\sqrt{(\pi/2)}\sigma_r$ é a média do envelope. Maior detalhamento matemático pode ser encontrado nas referências [1,3,6,11].

2.2 - Determinação da Área de Cobertura de Uma Célula .

O cálculo da área de cobertura de uma célula, em um sistema rádio móvel pode ser obtida pela modelagem das perdas de propagação no canal por métodos estatísticos, conforme resultados apresentados em [11,12]. Esta área de cobertura é caracterizada pela proporção da região atendida pela estação rádio base, onde o nível do sinal recebido encontra-se acima de um limiar pré-estabelecido nas especificações de projeto .

Dos modelos de cálculos das perdas de percurso sabe-se [6,11] que a relação entre as potências w_l e w_L do sinal recebido às distâncias l e L , respectivamente, do transmissor é dada por:

$$w_l = C w_L \left(\frac{l}{L} \right)^{-\alpha} \quad (2.3)$$

onde C é uma constante que depende da frequência de operação, potência do transmissor, ganhos das antenas, etc; α é o coeficiente de perda de percurso, variando entre 3 e 4. Definindo-se $M_W = 10 \log w_l$ em dB, temos que

$$M_W = K - 10 \alpha \log \left(\frac{l}{L} \right) \quad (2.4)$$

onde $k = 10 \log C w_L$.

Os métodos estatísticos explorados em [1,3,6,11] permitem adicionar às perdas de percurso os efeitos de sombreamento e/ou multipercurso. De fato em [11] este estudo é feito para todas as distribuições estatísticas do envelope do sinal, quais sejam, Log-Normal, Rayleigh, Rice e Suzuki. No trabalho que se segue exploraremos apenas os casos Log-Normal e Rayleigh.

Nos estudos dos cálculos da área de cobertura das células faz-se necessário o uso das distribuições de probabilidade das potências dos sinais recebidos. Seja r o envelope do sinal e $w = r^2/2$ a sua potência. Assim para o ambiente Log-Normal [11].

$$p(W_R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_w} \exp \left(- \frac{(W_R - M_w)^2}{2\sigma_w^2} \right) \quad (2.5)$$

onde $W_R = 10 \log w$, M_w é a potência média do sinal e σ_w é o desvio padrão em dB.

Para o caso do ambiente tipo Rayleigh, temos :

$$p(w_r) = \frac{1}{m_w} \exp \left(- \frac{w_r}{m_w} \right) \quad (2.6)$$

onde $w_r = w_l$ e m_w é a média e o desvio padrão da potência.

A área de cobertura da estação rádio base pode ser obtida se considerarmos uma região circular de raio L onde a potência recebida esteja acima de um limiar w_T . Seja μ a proporção de área onde $w \geq w_T$.

Assim :

$$\mu = \frac{1}{A} \int_A \text{prob} (w \geq w_T) dA \quad (2.7)$$

onde $A = \pi L^2$ é a área da região e dA o incremento infinitesimal de área. Transformando para as coordenadas $dA = l dl d\theta$, com $0 \leq l \leq L$ e $0 \leq \theta \leq 2\pi$, temos

$$\mu = \frac{2}{L^2} \int_0^L \text{prob} (w \geq w_l) l dl \quad (2.8)$$

2.2.1- Área de Cobertura para Ambiente Log-Normal

Utilizando-se a função densidade de probabilidade expressa em (2.5), temos que:

$$\text{prob} (W_r \geq W_T) = \frac{1}{2} \left[1 - \text{erf} \left(\frac{W_T - M_w}{\sqrt{2} \sigma_w} \right) \right] \quad (2.9)$$

Substituindo-se (2.9) em (2.8), integrando e observando que $M_w = K - 10 \alpha \log(l/L)$, temos então

$$\mu_R = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \text{erf}(a) + \exp \left(\frac{2ab + 1}{b^2} \right) \left[1 - \text{erf} \left(\frac{ab + 1}{b} \right) \right] \right\} \quad (2.10)$$

onde $a = (K - W_T) / \sqrt{2} \sigma_w$, $b = 10 \alpha \log(e) / \sqrt{2} \sigma_w$ e α é o coeficiente de perda de percurso, sendo erf a função erro. Esta expressão está plotada nas Figuras 2.1.a e 2.1.b, onde são visualizadas as influências do desvio padrão e coeficiente α na área de cobertura da célula num ambiente tipo Log-Normal. Note que o fator de maior influência no caso é o desvio padrão.

2.2.2- Área de cobertura para ambiente Rayleigh.

Do mesmo modo, partindo-se de (2.6), temos :

$$\text{prob} (w \geq w_T) = \exp \left(- \frac{w_T}{m_w} \right) \quad (2.11)$$

Assim, com (2.11) em (2.7)

$$\mu_r = \frac{2}{\alpha} \left(\frac{k}{w_T} \right)^{2/\alpha} \gamma^c \left(\frac{2}{\alpha}, \frac{w_T}{k} \right) \quad (2.12)$$

onde $\gamma_c(x, y) = \int_0^y e^{-t} t^{x-1} dt$, é a função Gamma incompleta complementar e $K = 10 \log(k)$. A proporção μ_r está plotada na Figura 2.2 para alguns valores de α .

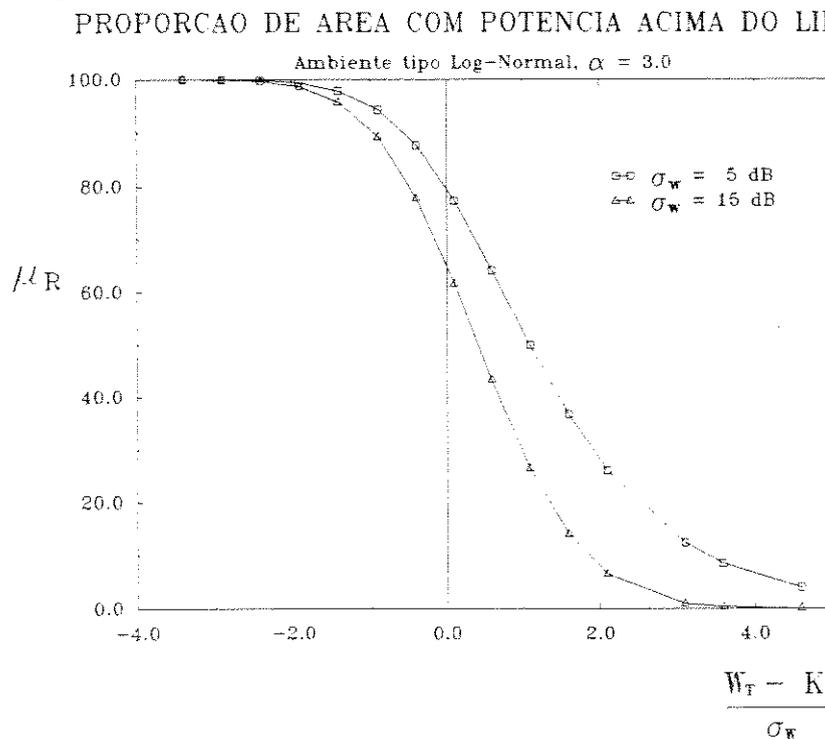


Fig. 2.1.a

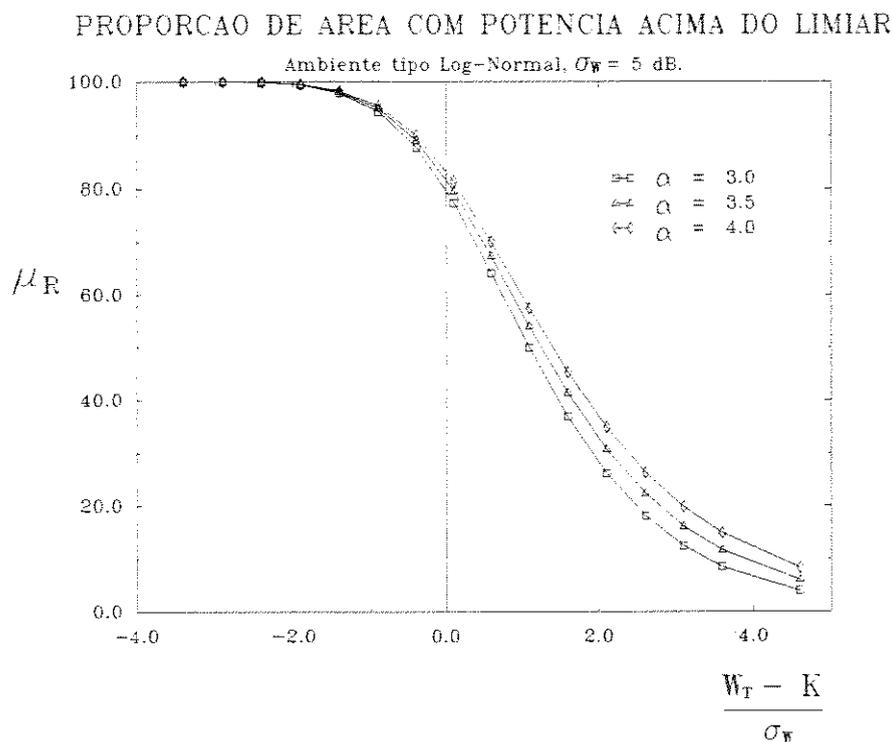


Fig. 2.1.b

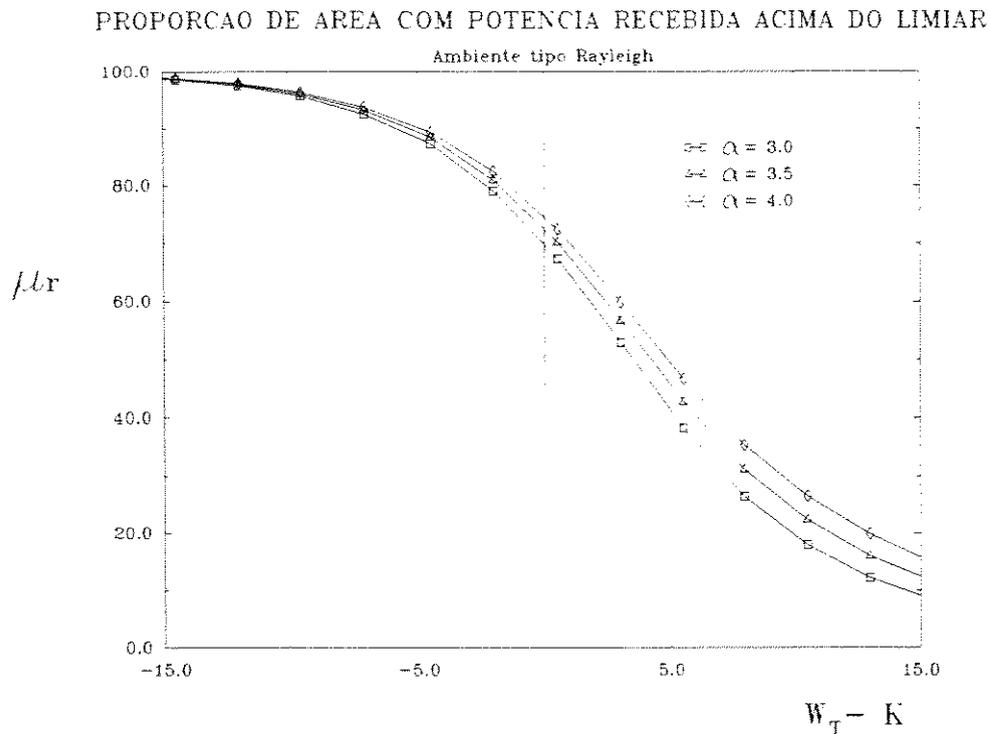


Fig. 2.2

2.3- Áreas de Sobreposição entre as Fronteiras das Células.

Devido às flutuações estatísticas nas perdas de propagação do canal de rádio móvel, as células do sistema não apresentam bordas definidas, existindo zonas de sobreposição entre as áreas de cobertura nas regiões de fronteira [6,9]. Assim, uma unidade móvel próxima à borda da célula pode experimentar comunicação adequada com mais de uma estação rádio base.

Esta região de sobreposição depende diretamente da distribuição do desvanecimento, da tolerância permitida entre as perdas nos diferentes caminhos de propagação para se ter um bom nível de comunicação, e finalmente, da distribuição geográfica das unidades móveis.

Vamos examinar o caso da unidade móvel experimentar comunicação com duas ou mais ERB's. Pretende-se determinar a proporção de usuários nesta condição. Assumindo-se que os assinantes móveis estão uniformemente distribuídos na célula, isto corresponde a determinar a proporção da célula onde os sinais recebidos de duas estações bases não diferem de um valor estabelecido de T dB.

De fato, este estudo pode ser feito com base na média ou no valor instantâneo do sinal. No primeiro caso o problema se resume a um cálculo de geometria, enquanto que no segundo utilizam-se os resultados do primeiro acrescidos dos efeitos do desvanecimento. Ainda no segundo caso, poderemos considerar os dois tipos de desvanecimentos, Log-Normal e Rayleigh, como no cálculo da área de cobertura.

2.3.1 - Proporção de Tráfego com Acesso a Dois Caminhos.

2.3.1.1- Distribuição Conjunta de Dois Sinais Rayleigh.

Considere dois sinais r_1 e r_2 , que sofrem a ação do desvanecimento Rayleigh. Se os desvanecimentos presentes nos dois caminhos são independentes, então a função densidade de probabilidade conjunta $p(r_1, r_2)$ é dada por

$$p(r_1, r_2) = p(r_1)p(r_2) \quad (2.13)$$

onde $p(r_i)$, $i=1,2$, é dado por

$$p(r_i) = \frac{r_i}{m_i^2} \exp\left[-\frac{r_i^2}{2m_i^2}\right], \quad i=1,2 \quad (2.14)$$

com $\sqrt{\pi/2} m_i$ sendo a média de r_i .

Definimos a diferença B em dB entre os níveis médios como

$$B = 20 \log b \quad (2.15)$$

onde $b = m_2 / m_1$.

A probabilidade $P(t, b)$ que os dois sinais não difiram mais que T dB no nível instantâneo, onde $T = 20 \log t$, é calculada na referência [6], e pode ser aproximada por:

$$P(t, b) = \frac{t^2 - \frac{1}{t^2}}{\left(t^2 + \frac{1}{t^2}\right) + \left(b^2 + \frac{1}{b^2}\right)} \quad (2.16)$$

2.3.1.2- Distribuição Conjunta de Dois Sinais Log-Normais.

Da mesma maneira, considerando-se dois sinais com níveis instantâneos R_i , e níveis médios M_i , expressos em dB, temos a seguinte densidade de probabilidade.

$$p(R_i) = \varphi\left(\frac{R_i - M_i}{\sigma_i}\right), \quad i=1,2 \quad (2.17)$$

onde $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right)$ é uma distribuição gaussiana. A razão entre as amplitudes instantâneas, expressa em dB, é dada por $R = R_1 - R_2$. Análogamente a relação entre níveis médios B é dada por $B = M_2 - M_1$.

A distribuição de probabilidade cumulativa dos dois sinais com uma diferença de nível que não exceda T dB é expressa por

$$P(T, B) = \Phi\left(\frac{B+T}{\sigma_w}\right) - \Phi\left(\frac{B-T}{\sigma_w}\right) \quad (2.18)$$

onde $\sigma_w^2 = \sigma_{w1}^2 + \sigma_{w2}^2$, e $T \geq 0$, e onde ainda

$$\Phi(u) = \int_{-\infty}^u \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} e^{-y^2/2} dy \quad (2.19)$$

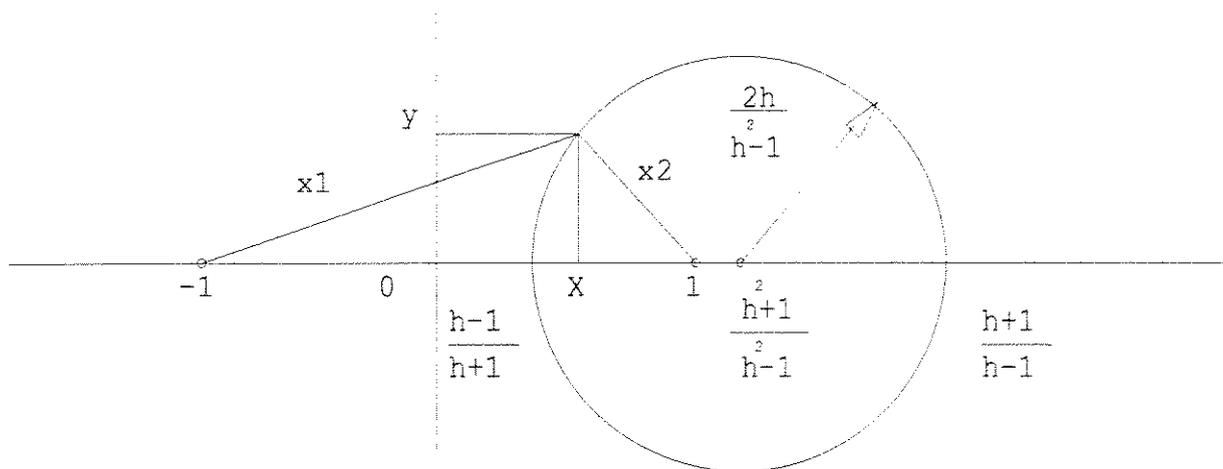
2.3.1.3- Distribuição Geográfica da Razão entre Potências Médias.

Como assumimos anteriormente, a potência média do sinal cai com a distância x da forma $x^{-\alpha}$, onde α é o coeficiente de perda do percurso. Sejam x_1 e x_2 as distâncias de uma unidade móvel respectivamente a duas ERB's de mesma potência. A razão b entre as potências médias m_1^2 e m_2^2 recebidas é dada por

$$b^2 = \left(\frac{m_2}{m_1}\right)^2 = \left(\frac{x_1}{x_2}\right)^\alpha \quad (2.20)$$

Podemos determinar o lugar geométrico dos pontos com esta razão. Seja h um parâmetro tal que $h = x_1/x_2 = b^{2/\alpha}$. Assuma as células com raios iguais a $2/\sqrt{3}$, tal que a distância entre as duas estações bases vizinhas seja 2. Assim da Figura 2.3, por simples geometria obtém-se

$$y^2 + \left(x - \frac{h^2 + 1}{h^2 - 1}\right)^2 = \left(\frac{2h}{h^2 - 1}\right)^2 \quad (2.21)$$



Lugar geométrico com razão de potência b.

Fig. 2.3

Vamos estimar a proporção da área da célula onde a diferença nas perdas médias nos caminhos esteja dentro da tolerância B dB. Considere a Figura 2.4.a, onde estão representadas duas células adjacentes. Para efeito de cálculo vamos considerar, por simetria, somente um setor triangular correspondente a $1/12$ da célula. O triângulo OAB , correspondendo a um setor da célula, está representado na Figura 2.4.b.. Na mesma figura, o ponto C representa o centro $[(h^2 + 1)/(h^2 - 1), 0]$ da circunferência definida em (2.21).

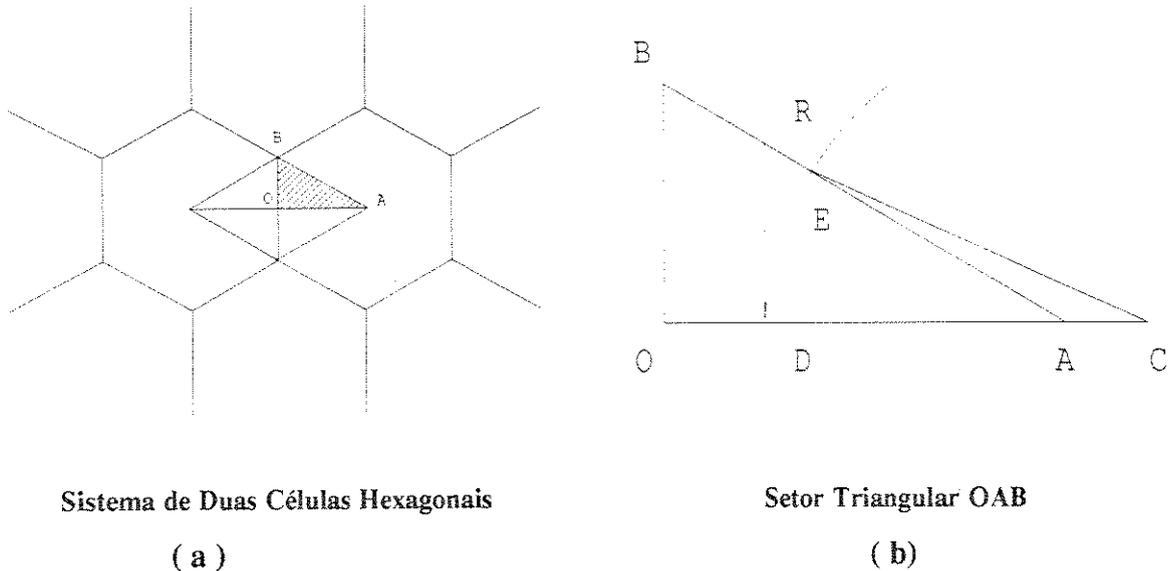


Fig. 2.4

Para uma dada tolerância, a razão de potência b pode ser calculada e conseqüentemente a razão h . Isto define um círculo com centro em C , do qual DE é um arco. Dentro da área definida por $OBED$, a razão de potência média estará dentro da tolerância permitida. Logo a proporção de área com tal relação de potência é expressa por:

$$\gamma = \frac{\text{area } OBED}{\text{area } OBA} \quad (2.22)$$

Se considerarmos as unidades móveis igualmente distribuídas pela célula, então γ é a proporção de unidades móveis com acesso a duas ou mais estações rádio com nível de recepção dentro da tolerância permitida.

2.3.1.4- Distribuição Geográfica da Razão entre Potências Instantâneas.

A presença do desvanecimento modifica a distribuição da razão das potências, pois com a flutuação nos níveis de recepção que os desvanecimentos Log-normal e Rayleigh ocasionam, tanto no tempo quanto no espaço, nem todas as unidades móveis dentro da área estarão dentro da tolerância permitida. Por exemplo, em um ambiente submetido a desvanecimento Rayleigh, basta uma unidade se deslocar uma pequena distância para experimentar desvanecimentos profundos de até dezenas de dB's. Do mesmo modo, outras unidades móveis fora desta área poderão se comunicar com mais de uma estação rádio. É possível estimarmos a proporção global

de unidades móveis com acesso a mais de um caminho, através do critério de potência instantânea em contraste com o critério de potência média.

Para determinarmos a proporção de unidades móveis com comunicação satisfatória com duas ERB's, consideremos a Figura 2.3, onde x é a posição variável, e seja $d(x) = 2(1-x)$ uma aproximação da densidade de móveis nas proximidades de x [6,9,10]. Com base nas expressões (2.16), (2.18), (2.19) e obtendo a probabilidade $P(t,x)$ condicional em x , podemos calcular a proporção de unidades móveis γ por

$$\gamma = \int_0^1 d(x) P(t,x) dx \quad (2.23)$$

onde $P(t,x)$ é obtida de $P(t,b)$ com a aproximação: $b^2 = \left(\frac{x_1}{x_2}\right)^\alpha \approx \left(\frac{1+x}{1-x}\right)^\alpha$ [6,10]

Assim temos para o caso do ambiente tipo Rayleigh, utilizando (2.16) em (2.23)

$$\gamma = \int_0^1 2(1-x) \left[\frac{t^2 - 1/t^2}{(t^2 + 1/t^2) + \left(\frac{1+x}{1-x}\right)^\alpha + \left(\frac{1-x}{1+x}\right)^\alpha} \right] dx \quad (2.24)$$

A Figura 2.5 mostra a variação de $P(t,x)$ com a distância x , para tolerâncias permitidas para as perdas entre dois caminhos, em um ambiente Log-Normal, onde $T = 20 \log t$.

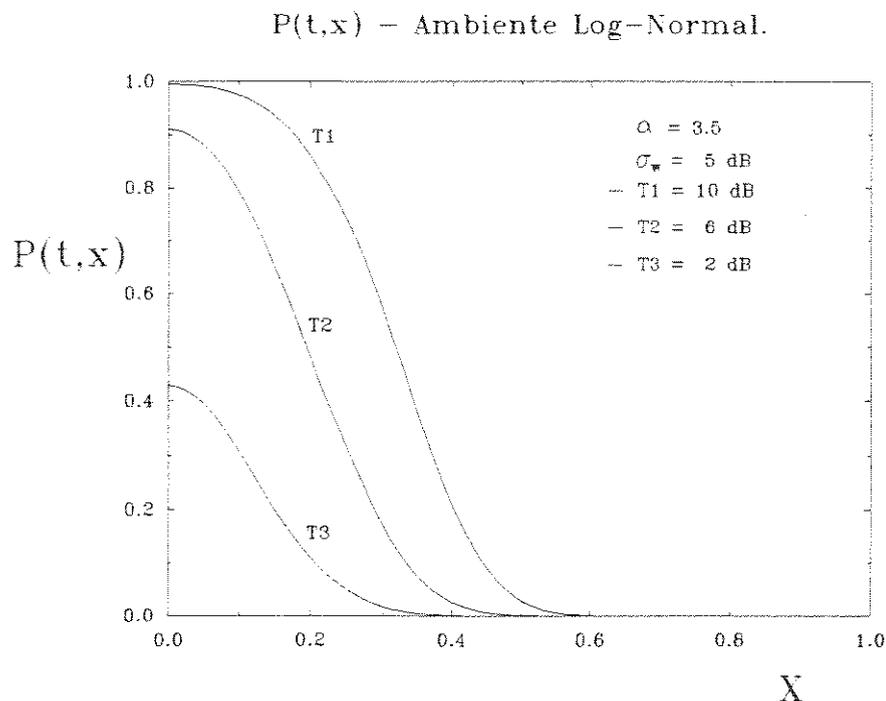


Fig. 2.5

E para o ambiente tipo Log-Normal, utilizando (2.18) e (2.23) temos

$$\gamma = \int_0^1 2(1-x) \left[\Phi \left(\frac{B-T}{\sigma_w} \right) - \Phi \left(\frac{B+T}{\sigma_w} \right) \right] dx \quad (2.25)$$

Como $\Phi(x)$ é gaussiana, mudando os limites de integração, temos

$$\Phi(u) = \int_{-\infty}^u \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} e^{-y^2/2} dy = 1 - \int_u^{\infty} \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} e^{-y^2/2} dy \quad (2.26)$$

Fazendo mudanças de variáveis em (2.26), podemos utilizar a função erro complementar, obtendo:

$$\Phi(u) = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(u) \quad (2.27)$$

Assim, temos:

$$\gamma = \int_0^1 (1-x) \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{B+T}{\sigma_w} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{B-T}{\sigma_w} \right) \right] dx \quad (2.28)$$

As integrais (2.24) e (2.28) podem ser calculadas por métodos numéricos, como por exemplo utilizando as regras de Simpson ou o método dos trapézios. Alguns resultados estão plotados nas figuras a seguir.

A Figura 2.6 mostra a influência de α sobre a área de sobreposição γ , em um ambiente sujeito a desvanecimento Log-Normal, com desvio padrão de 5 dB. Na Figura 2.7 ilustramos a influência do desvio padrão σ_w sobre a área de sobreposição γ , onde observamos que quanto maior o desvio padrão, menor a área de sobreposição.

A Figura 2.8 ilustra a influência do coeficiente de perda de percurso α sobre a proporção de área de sobreposição γ , em um ambiente sujeito a desvanecimento tipo Rayleigh, dadas várias tolerâncias (T dB) permitidas entre os níveis de recepção nos dois caminhos, obtendo-se um comportamento bem semelhante ao ambiente Log-Normal. Logicamente, quanto menor o coeficiente α ou maior a tolerância T , maior a área de sobreposição γ .

Os resultados obtidos nas Figuras 2.6 e 2.8 onde calculamos as proporções de áreas de sobreposição entre duas células vizinhas, são compatíveis com os cálculos de área de cobertura de célula apresentados nas Figuras 2.1.a, 2.1b e 2.2. Por exemplo, no caso do ambiente tipo Log-Normal, o aumento do desvio padrão σ_w diminui a área de cobertura da célula (Fig. 2.1.a), em consequência, a proporção de área de sobreposição entre as células também diminui.

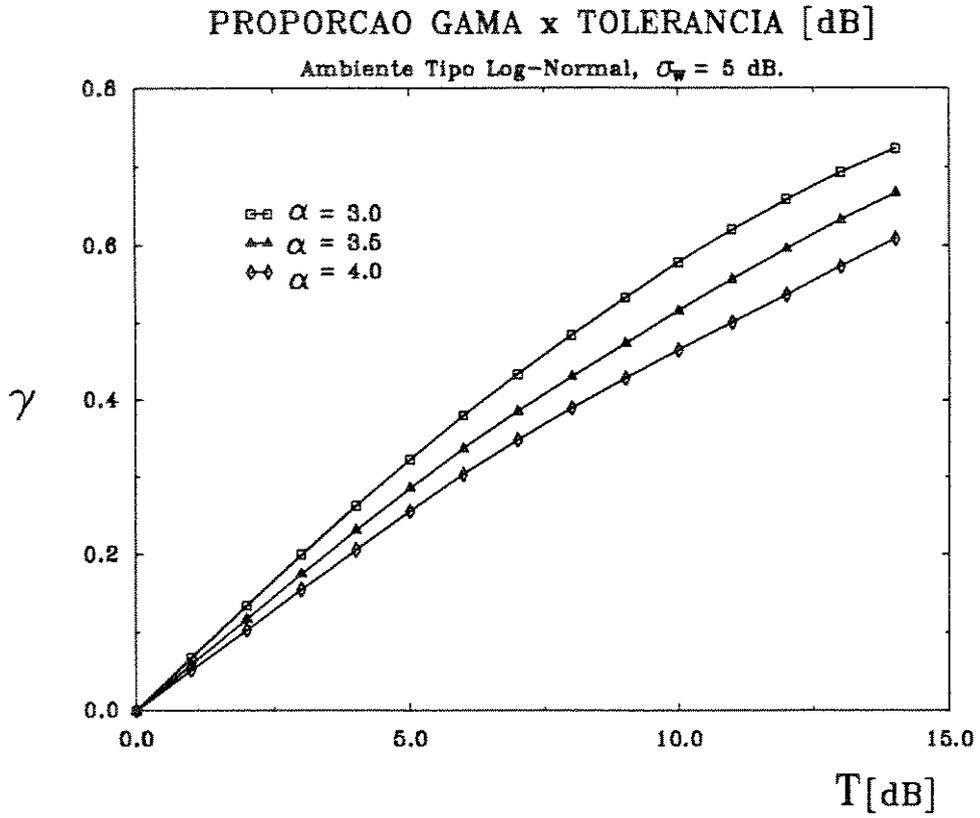


Fig. 2.6

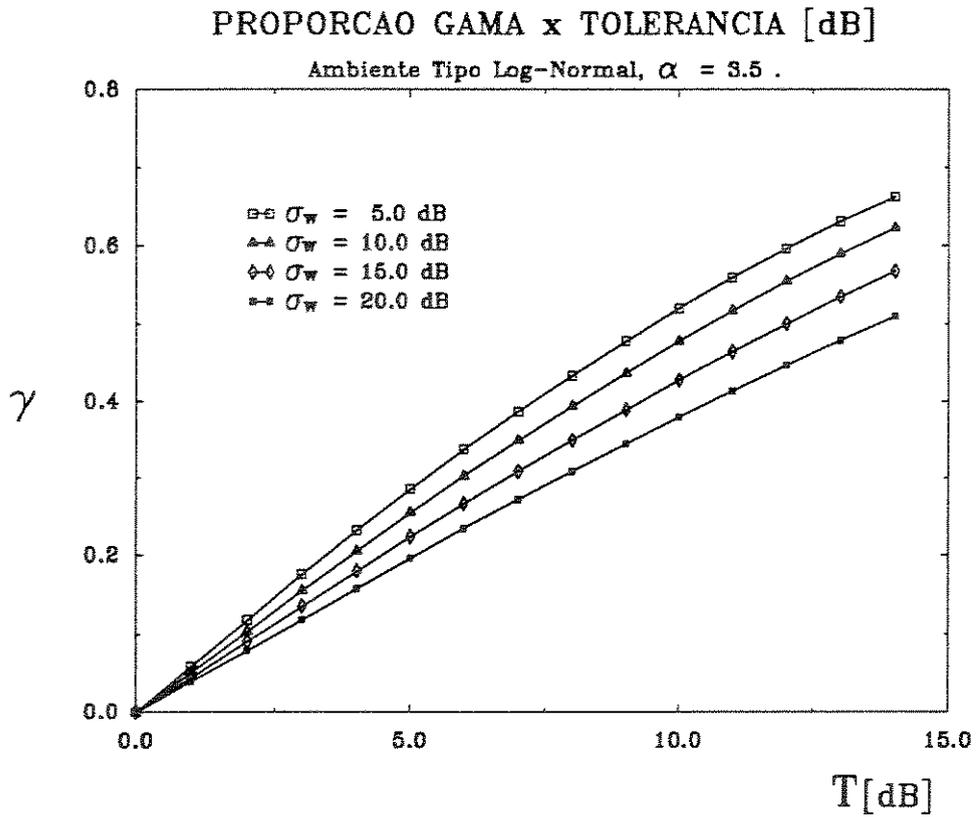


Fig. 2.7

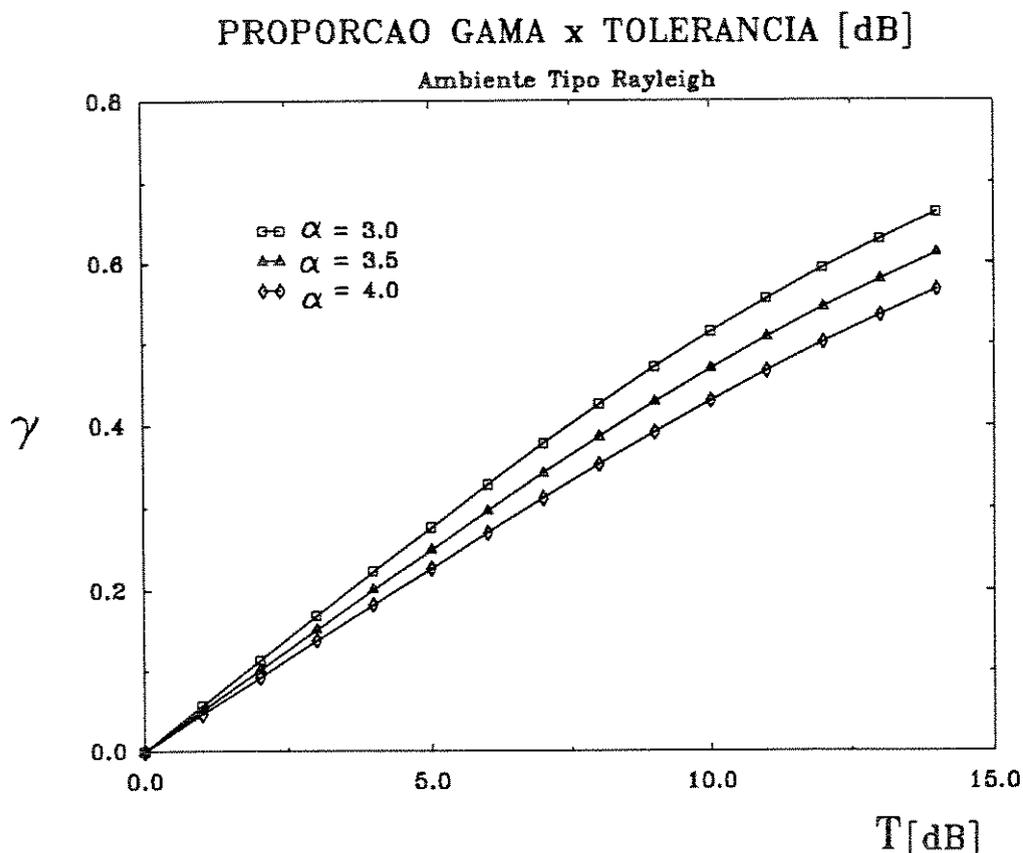


Fig. 2.8

2.4 - Proporção de Tráfego com Acesso a Três Caminhos.

Resultados obtidos por outros estudos [6,9,10] mostram que uma parcela razoável das unidades móveis com comunicações adequadas com pelo menos duas ERB's também conseguem se comunicar com boa qualidade com uma terceira ERB.

Estendendo-se os modelos anteriores, com vistas ao acesso a um terceiro caminho, podemos calcular as estatísticas conjuntas para três caminhos, e estimar a proporção de tráfego flexível δ que pode ser encaminhado para qualquer uma destas três ERB's. Este processo de cálculo é complexo e pode ser encontrado em [6].

No nosso caso utilizaremos uma função de aproximação entre as proporções de tráfego com acesso a dois caminhos (γ) e três caminhos (δ). Como é possível determinarem-se estas proporções em função de uma mesma tolerância T dB, então podemos encontrar um função de aproximação, já que δ em função de γ não pode ser encontrada em uma forma fechada. Assim uma aproximação razoável sugerida em [6] é dada por

$$\delta = 1.25 \gamma^2 \quad \text{para } 0.0 \leq \gamma \leq 0.8$$

$$\delta = \gamma \quad \text{para } 0.8 < \gamma \leq 1.0$$

E temos então a Figura 2.9 com a proporção de tráfego com acesso a três caminhos em função da tolerância T dB.

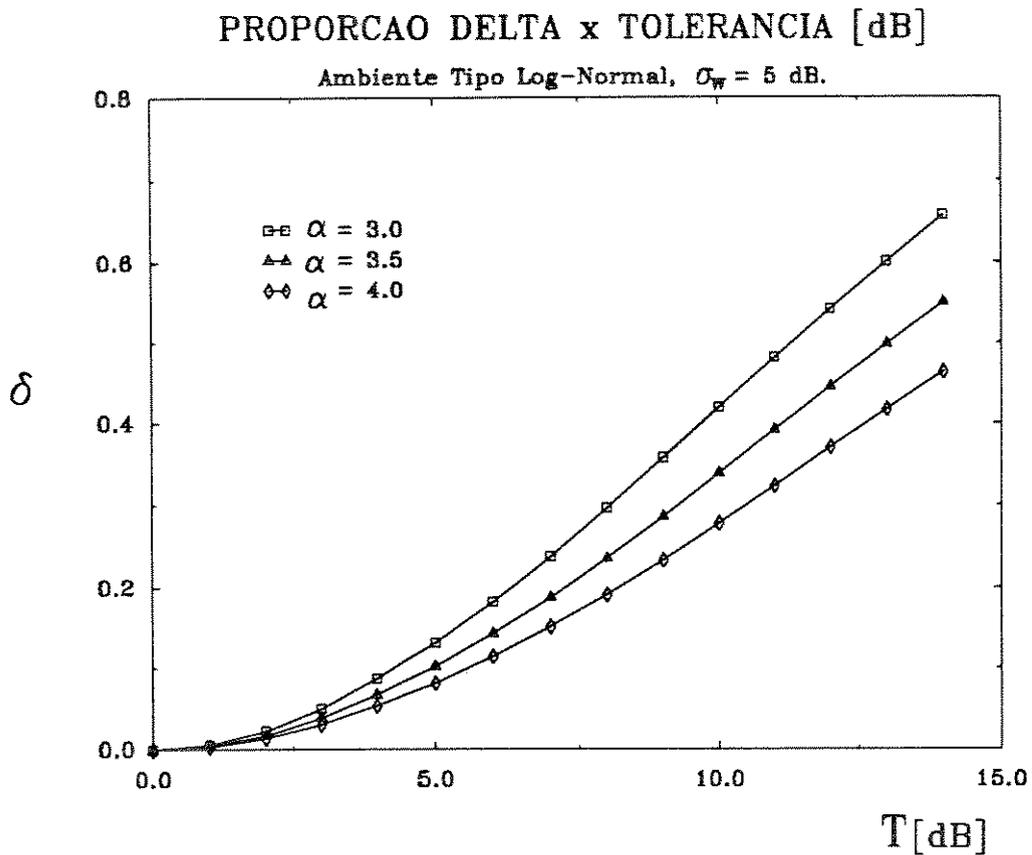


Fig. 2.9

2.5 - Sumário e Conclusões.

O cálculo da área de cobertura de uma célula em um sistema rádio móvel pode ser obtida pelo modelamento das perdas de propagação no canal. Consideram-se três efeitos básicos para o modelamento, quais sejam : perda de percurso, sombreamento e multipercurso. Os efeitos de sombreamento e multipercurso foram modelados pelas distribuições Log-Normal e Rayleigh, respectivamente.

A cobertura da célula é determinada pela proporção de área de um círculo centrado na ERB, no interior do qual o nível de potência do sinal recebido está acima de um limiar pré-estabelecido, em presença de desvanecimento tipo Log-Normal ou Rayleigh. No ambiente tipo Rayleigh, a variação do coeficiente de perda de percurso α apresenta uma maior influência sobre a área de cobertura quando o limiar W_T tem valor superior à média do sinal M_w , ou seja a parte positiva da abscissa da Figura 2.2. No ambiente tipo Log-Normal, a maior influência sobre a área de cobertura é exercida pelo desvio padrão σ_w , conforme as Figuras 2.1.a e 2.1.b. Já a influência da variação de α é semelhante ao caso do ambiente tipo Rayleigh.

A determinação das áreas de sobreposição entre fronteiras das células depende dos parâmetros de propagação, como também da probabilidade de unidades móveis experimentarem comunicações com qualidade aceitável com duas ou mais ERB's em determinados locais das células, em função de uma tolerância permitida de T dB entre os diferentes caminhos de propagação. Utilizando-se o critério da razão entre as potências instantâneas dos sinais dos

diferentes caminhos, calculamos a proporção de unidades móveis que experimentam comunicações adequadas com duas e três ERB's, respectivamente proporções γ e δ , nos ambientes tipo Log-Normal e Rayleigh.

Para o caso de duas células adjacentes, para uma dada tolerância $T = 7$ dB teremos uma proporção de sobreposição γ de ≈ 38 % para um ambiente Log-Normal com $\sigma_w = 5$ dB e coeficiente de perda de percurso $\alpha = 3.5$, conforme Figura 2.6.

Enquanto para o mesmo limiar e coeficiente de perda de percurso α teremos uma área de sobreposição γ de ≈ 34 % em um ambiente tipo Rayleigh, conforme Figura 2.7. Estes valores são muito significativos, indicando ser interessante o estudo de técnicas de encaminhamento alternativo para o tráfego gerado por usuários transmitindo destas áreas de sobreposição.

CAPÍTULO 3

TÉCNICAS DE ENCAMINHAMENTO ALTERNATIVO

Neste capítulo, serão apresentadas algumas técnicas de encaminhamento de tráfego alternativo. Estas técnicas são aplicadas ao tráfego gerado pelos usuários móveis operando nas áreas de sobreposição entre células adjacentes. Serão apresentados modelos e parâmetros dos processos de tráfego para duas e três células. Os algoritmos de encaminhamento alternativo se distinguem pelas informações disponíveis sobre o sistema e pelas regras de decisão adotadas.

Dentre as várias estratégias existentes será detalhada uma em particular, sendo esta a utilizada nos estudos de interferência de canal adjacente. De fato, os estudos dos capítulos subseqüentes poderiam ser aplicados a qualquer uma das técnicas a serem descritas, sem apresentar dificuldade alguma. O objetivo é mostrar a influência da distribuição de tráfego na interferência de canal adjacente. Este capítulo apresenta o método de análise das técnicas de encaminhamento alternativo, onde a probabilidade de bloqueio constitui o parâmetro de desempenho.

3.1- Estratégias de Encaminhamento Alternativo

No capítulo anterior mostramos que a proporção de unidades móveis com comunicação adequada com mais de uma estação rádio base (ERB) é muito significativa. Por exemplo, tolerando-se uma diferença de 6 dB entre dois caminhos de propagação, a proporção de unidades móveis com acesso a duas ERB's é algo em torno de 30 a 45%. Por este fato, a utilização de estratégias de encaminhamento alternativo do tráfego gerado nas áreas de sobreposição entre células adjacentes vem sendo investigadas intensivamente, sempre visando a melhoria no grau de serviço do sistema.

No entanto, para a aplicação destas técnicas deve-se estudar cuidadosamente os critérios de handoff do sistema. De fato, a maioria das estratégias de handoff [4,5,6] baseiam-se em critérios de potência de sinal e/ou taxas de erro na recepção, assim, quando permite-se uma certa tolerância para se comunicar com mais de uma ERB, ocorre naturalmente uma pequena degradação na qualidade de transmissão. Então, no sentido de se evitar handoffs desnecessários, os critérios de decisão para a inicialização do processo de handoff devem ser revistos [19].

Um algoritmo prático para encaminhamento deve se basear na hipótese de uma nova chamada ser indentificada à tempo como oriunda da zona de sobreposição entre as fronteiras das células. Este tipo de chamada é dita pertencente ao *tráfego flexível*, ou seja, passível de ser desviado para outra célula. Podemos ainda diferenciar este tráfego flexível como tendo acesso a

somente duas ou a mais de duas ERB's. Estes algoritmos diferem basicamente na utilização de informações como estado de ocupação dos canais e o tráfego médio do sistema. Durante o procedimento de início de chamada, é possível se ter acesso às seguintes informações:

- Número de canais ocupados em cada célula.
- Ocorrência instantânea de bloqueio.
- O tráfego fixo médio em cada célula.
- O tráfego flexível médio em cada célula.

Quanto à utilização somente da informação dos níveis médios de tráfego, ou somente o estado instantâneo do tráfego, ou ainda uma mescla destas informações, podemos citar as seguintes técnicas :

- **MAP (Mean Adaptation)** - baseada nas estimativas de tráfego médio.
- **ARB (Adaptative Response to Blocking)** -baseada no reconhecimento das condições de bloqueio das células.
- **AMB (Adaptation to Mean and Blocking)** -combinação das duas estratégias anteriores.
- **IAP (Instantaneous Adaptation)** - baseada no conhecimento dos estados instantâneos de tráfego, ou seja, qual o número de canais ocupados nas células em cada instante.
- **IMA (Instantaneous and Mean Adaptation)** - baseada no conhecimento do número de canais ocupados nas células em cada instante e nos níveis médios de tráfego.

Vamos adotar aleatoriamente somente uma destas técnicas para efeito de estudo sobre a influência do encaminhamento alternativo na distribuição de tráfego e desempenho do sistema. A escolhida foi a técnica IAP, onde as chamadas flexíveis são identificadas imediatamente e o estado instantâneo do sistema é conhecido. O objetivo desta estratégia é dirigir o tráfego flexível para a célula com maior número de canais livres, independentemente do fato da célula a qual o móvel pertença ainda possuir canais livres, sempre tentando equalizar o tráfego entre as células adjacentes participantes do sistema. Se estas células adjacentes possuem o mesmo número de canais livres, então o tráfego flexível é igualmente distribuído entre elas.

3.2 - Processos de Markov.

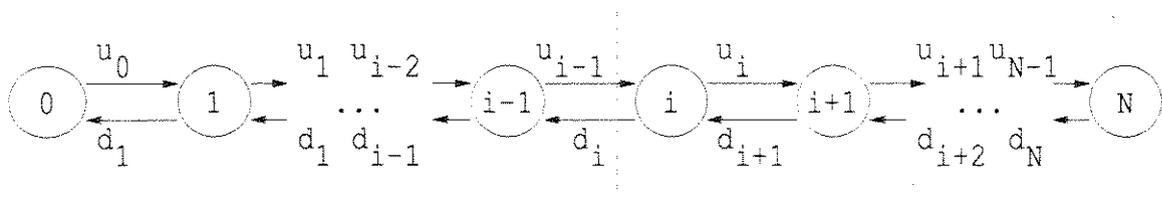
Em um sistema celular, o processo de tráfego das chamadas pode ser modelado por meio de cadeias de Markov, e em particular por processos de *nascimento-morte*. O processo será bi ou tridimensional dependendo se duas ou três células estão envolvidas no mesmo.

Os estados possíveis do sistema representam o número de canais ativos (ocupados) a cada instante. Por exemplo, a transição do estado (*i*) para o estado (*i+1*) representa a chegada de uma nova chamada, e por sua vez, a passagem do estado (*i*) para (*i-1*) corresponde ao término de uma

chamada. Assumimos que as probabilidades de transição podem ser definidas como dependentes somente do estado em que o sistema se encontra, implicando que a chegada de chamadas segue uma distribuição de Poisson. Assumimos que o tempo de duração da chamada segue uma distribuição exponencial negativa.

3.2.1 - Modelo do Processo de Markov para uma Célula.

O diagrama de estados na Figura 3.1 representa um processo de nascimento-morte para uma célula com N canais. As densidades de probabilidades de transição no sentido crescente, ou de nascimentos, são representadas por u_i e definidas como taxa de chegada. As densidades de probabilidades no sentido decrescente, ou de mortes, são representadas por d_i , taxa de morte. No equilíbrio temos : $d_i p_i = u_{i-1} p_{i-1}$, onde p_i é a probabilidade do estado de equilíbrio.



CADEIA DE MARKOV UNIDIMENSIONAL

Fig. 3.1

Se considerarmos que o tempo médio da chamada é independente do estado do sistema então $d_i = i$. E se considerarmos que o tráfego oferecido é constante e igual a A, então $u_i = A$. Pode se demonstrar que :

$$p_i = \frac{A^i / i!}{\sum_0^N A^j / j!} \quad (3.1)$$

que é a distribuição de Erlang. Se o bloqueio ocorre somente quando o sistema atinge o estado N, ou seja, todos os canais ocupados, então a probabilidade de bloqueio é a fórmula de Erlang-B dada por :

$$p_N = \frac{A^N / N!}{\sum_0^N A^j / j!} \quad (3.2)$$

3.2.2 - Processo de Markov para Duas e Três Células.

Do mesmo modo, podemos estender os resultados do item anterior para o caso de duas ou três células. Vamos nestes casos considerar a existência de tráfego mútuo entre as células. O

diagrama de estados da Figura 3.2, representa o processo de nascimento e morte para duas células.

Agora o número do estado é um vetor de duas componentes que representam o número de canais ocupados em cada célula. Em geral, o modelo bidimensional não admite uma solução simples, sendo necessária uma teoria mais geral de cadeia de Markov.

Para cada estado podem existir até quatro outros estados possíveis vizinhos, para os quais o sistema pode transicionar. Se considerarmos cada célula com N canais, existirão no total $(N+1)^2$ estados possíveis, que nos fornecem $(N+1)^2$ equações de equilíbrio. Este sistema pode ser representado matricialmente por:

$$M P = Z \quad (3.3)$$

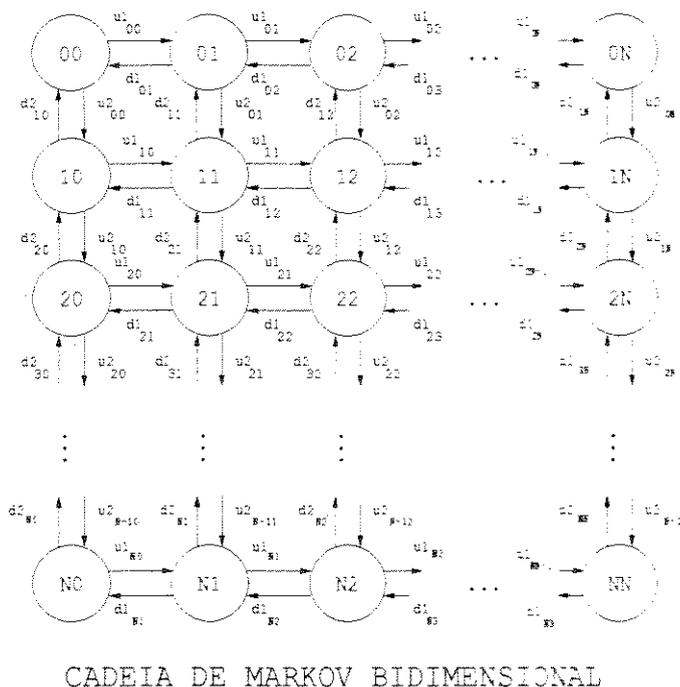


Fig. 3.2

onde M é uma matriz de ordem $(N+1)^2 \times (N+1)^2$ contendo os coeficientes das probabilidades de transição (matriz estocástica), P é um vetor coluna $(N+1)^2$ (vetor das probabilidades de equilíbrio) e Z é um vetor coluna de zeros.

A matriz M em (3.3) não é inversível, já que seu determinante é nulo. O sistema pode ser resolvido se substituirmos uma linha de M por um vetor de 1's, matriz M', e substituirmos o n-ésimo componente de Z por 1, Z'. Isto elimina a indeterminação de M. De fato, isto corresponde a se levar em conta que a soma de todas as probabilidades deve ser igual a 1. Assim

$$P = M'^{-1} Z' \quad (3.4)$$

De maneira análoga podemos resolver o problema para três células adjacentes, lembrando que neste caso cada estado possível do sistema é cercado por outros seis estados. A matriz M se

torna uma matriz de ordem $(N+1)^3 \times (N+1)^3$, o vetor P de ordem $(N+1)^3$ e o vetor Z de ordem $(N+1)^3$.

3.3 - Encaminhamento Alternativo para Duas Células Adjacentes.

Vamos agora estudar o encaminhamento alternativo para o tratamento do caso de considerarmos somente duas células adjacentes. Os resultados obtidos poderão ser extrapolados para o caso seguinte de três células adjacentes.

3.3.1 - Parâmetros de Tráfego

O tráfego oferecido no sistema de duas células é definido por três variáveis independentes que são : o tráfego fixo da célula 1 (A_1), o tráfego fixo da célula 2 (A_2) e o tráfego flexível total (A_{12}). (ver Figura 3.3).

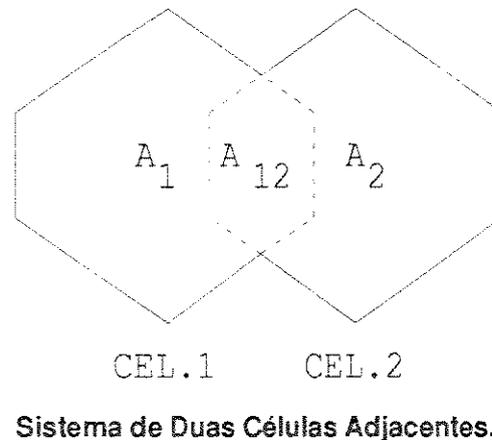


Fig. 3.3

É conveniente analisar o sistema em termos do tráfego global A, onde

$$A = A_1 + A_2 + A_{12} \quad (3.5)$$

Considere dois parâmetros que definem o desbalanceamento de tráfego (β), e o grau de flexibilidade (γ). A flexibilidade γ foi definida geométrica e estatisticamente no Capítulo 2. Se considerarmos as unidade móveis distribuídas uniformemente sobre as áreas das células, podemos redefini-lo como sendo a proporção do tráfego flexível sobre o tráfego total do sistema.

$$\gamma = \frac{A_{12}}{A} \quad (3.6)$$

O parâmetro de desbalanceamento do tráfego fixo entre as células é dado por

$$\beta = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} \quad (3.7)$$

Dados os parâmetros acima podemos escrever:

$$A_1 = \frac{1}{2} A (1 - \gamma) (1 + \beta)$$

$$A_2 = \frac{1}{2} A (1 - \gamma) (1 - \beta)$$

$$A_{12} = \gamma A \quad (3.8)$$

Obviamente, um parâmetro necessário à análise é o número de canais por célula (N).

3.3.2- Densidades de Probabilidade de Transição.

As densidades de probabilidade de transição dependem dos parâmetros de tráfego e procedimentos de encaminhamento.

- Probabilidade de Transição Decrescente

A probabilidade de redução na ocupação de canal de cada célula é , assumindo-se tempo de duração da chamada com distribuição exponencial negativa, proporcional ao número de canais ocupados em cada célula. Normalizando, i.e., admitindo-se que este tempo médio é igual a 1 temos que

$$d_{1ij} = j$$

$$d_{2ij} = i$$

- Probabilidade de Transição Crescente

Considerando-se a ausência de encaminhamento alternativo ($\gamma = 0$) temos : $u_{1ij} = A_1, 0 \leq i \leq N - 1$ e $u_{2ij} = A_2, 0 \leq j \leq N - 1$. Na presença de encaminhamento alternativo a estratégia deve ser levada em conta.

Estas estratégias dependem das seguintes hipóteses:

- (i) chamadas flexíveis ocorrem aleatoriamente com probabilidade γ .
- (ii) chamadas flexíveis são identificadas à tempo de se especificar os procedimentos .
- (iii) chamadas flexíveis podem ser encaminhadas para qualquer célula em proporções arbitrárias.

Com base nestas hipóteses, as probabilidades de transição são limitadas inferiormente pelo tráfego fixo da célula e superiormente pela soma do tráfego fixo mais todo o tráfego alternativo.

Assim :

$$A_1 \leq u_{1ij} \leq A_1 + A_{12} \quad e \quad A_2 \leq u_{2ij} \leq A_2 + A_{12}, \text{ com } u_{1ij} + u_{2ij} = A.$$

A escolha da proporção de tráfego flexível desviado distingue as estratégias. Define-se, para cada estado (i,j) , um parâmetro α_{ij} , tal que:

$$u_{1ij} = A_1 + \frac{1}{2} A_{12} (1 + \alpha_{ij}) = \frac{1}{2} A [1 + \beta + \gamma(\alpha_{ij} - \beta)] \quad (3.9.a)$$

$$u_{2ij} = A_2 + \frac{1}{2} A_{12} (1 - \alpha_{ij}) = \frac{1}{2} A [1 - \beta - \gamma(\alpha_{ij} - \beta)] \quad (3.9.b)$$

Assim para qualquer procedimento de encaminhamento existe uma matriz α de coeficientes tal que:

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_{00} & \alpha_{01} & \dots & \alpha_{0N} \\ \alpha_{10} & \alpha_{11} & \dots & \dots \\ \cdot & \cdot & \dots & \dots \\ \alpha_{N0} & \alpha_{N1} & \dots & \alpha_{NN} \end{bmatrix}$$

Na estratégia escolhida para fins de estudo, técnica IAP, nenhum parâmetro de tráfego médio é conhecido. As regras de decisão são baseadas puramente na ocupação instantânea dos canais das células. Assim a célula com maior número de canais livres terá a preferência sobre as chamadas flexíveis ocorrentes na sua área de sobreposição.

Caso ambas as células tenham o mesmo número de canais livres, então o tráfego flexível é dividido igualmente para cada célula. Logo os coeficientes de encaminhamento nesta estratégia seguem a seguinte regra:

$$\alpha_{ij} = - \text{sign}(j - i) \quad (3.10)$$

Por exemplo, caso a célula dois esteja mais ocupada:

$$j > i \Rightarrow \alpha_{ij} = - (+1) = -1, \text{ assim:}$$

$$u_{1ij} = A_1 + A_{12}, \text{ e } u_{2ij} = A_2$$

Logo quem irá tratar o tráfego flexível A_{12} naquele instante será a célula 1.

3.3.3 - Medidas de Desempenho.

O desempenho do sistema pode ser calculado pelas probabilidades de bloqueio. Num sistema de duas células temos os seguintes tipos de tráfego experimentando bloqueios diferentes

- (i) T_1 - tráfego bloqueado se somente célula 1 está bloqueada.
- (ii) T_2 - tráfego bloqueado se somente célula 2 está bloqueada.
- (iii) T_{12} - tráfego bloqueado se células 1 e 2 estão bloqueadas.

Para o tipo de estratégia escolhida, que depende da situação de ocupação instantânea da célula, temos que:

$$T_1 = A_1, T_2 = A_2 \text{ e } T_{12} = A_{12} \quad (3.11)$$

Definindo B_1 , B_2 e B_{12} como as probabilidades de bloqueio encontradas por T_1 , T_2 e T_{12} , podemos relacioná-las com as probabilidades de estado do processo Markoviano, como:

$$B_1 = \sum_{i=0}^N P_{iN}, \quad B_2 = \sum_{j=0}^N P_{Nj} \quad \text{e} \quad B_{12} = B_1 \cap B_2 \quad (3.12)$$

onde, $B_{12} < B_1$ e $B_{12} < B_2$, e caso o sistema esteja balanceado $B_1 = B_2$. O bloqueio médio do sistema pode ser definido como:

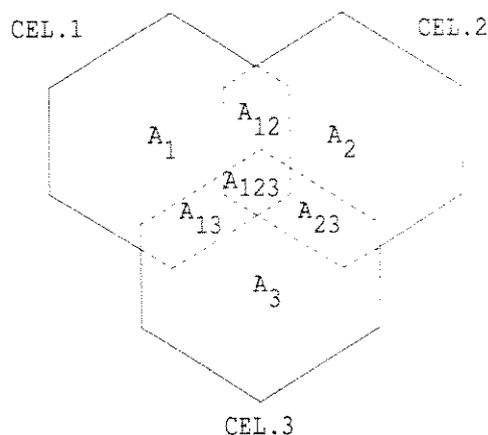
$$B_m = \frac{1}{A} (T_1 B_1 + T_2 B_2 + T_{12} B_{12}) \quad (3.13)$$

3.4 - Encaminhamento Alternativo para Três Células Adjacentes.

Estudos teóricos [6,9] sugerem que uma boa proporção do tráfego com acesso a duas ERB's também pode se comunicar com uma terceira ERB, tornando interessante a extensão das estratégias de encaminhamento alternativo para uma terceira opção de caminho nas regras de decisão dos algoritmos.

3.4.1 - Parâmetros de Tráfego.

Analogamente ao caso de duas células adjacentes, utilizaremos os parâmetros de tráfego total (A), flexibilidade (γ), desbalanceamento (β) e número de canais (N). Os fluxos de tráfego deste sistema estão representados na Figura 3.4.



Sistema de Três Células Adjacentes.

Fig. 3.4

onde temos os possíveis tráfegos gerados no sistema:

- (i) A_1 , A_2 e A_3 - tráfegos fixos das células 1, 2 e 3.
- (ii) A_{12} , A_{23} e A_{13} - tráfegos flexíveis com acesso a só 2 caminhos.
- (iii) A_{123} - tráfego flexível com acesso a 3 caminhos.

Assim

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_{12} + A_{23} + A_{31} + A_{123} \quad (3.14)$$

onde A é o tráfego global. Definindo δ como a proporção de tráfego com acesso a três ERB's, $(\gamma - \delta)$ a proporção de tráfego com acesso a somente duas ERB's e definindo ainda :

$$\beta_i = \frac{A_i - A_m}{A_m}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.15.a)$$

$$A_m = \frac{1}{3} (A_1 + A_2 + A_3) = \frac{1}{3} (1 - \gamma) A \quad (3.15.b)$$

onde A_m é o tráfego fixo médio e β_i o desbalanceamento individual da célula i , temos da referência [6]

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

$$A_{12} = \frac{1}{6} A (\gamma - \delta) (2 - \beta_3)$$

$$A_{23} = \frac{1}{6} A (\gamma - \delta) (2 - \beta_1)$$

$$A_{13} = \frac{1}{6} A (\gamma - \delta) (2 - \beta_2)$$

$$A_{123} = \delta A \quad (3.16)$$

Um caso de interesse no estudo do sistema de três células é considerar que a estratégia não utiliza a opção do terceiro caminho, isto é, o móvel irá procurar por só uma ERB a mais com comunicações adequadas, além da ERB a qual pertence. Assim o tráfego A_{123} será distribuído convenientemente nos grupos com acesso a somente duas ERB's. Logo neste caso o parâmetro δ deve ser considerado nulo pelo algoritmo.

3.4.2 - Densidades de Probabilidade de Transição

- Probabilidade de transição decrescente.

Novamente assumimos que o tempo de duração da chamada tem uma distribuição exponencial negativa. A probabilidade de redução da ocupação de qualquer célula é proporcional ao número de canais ocupados nesta célula.

$$d_{1ijk} = k, \quad d_{2ijk} = j, \quad d_{3ijk} = i \quad (3.17)$$

- Probabilidade de Transição Crescente.

No caso de três células podemos considerar as seguintes situações :

- (i) Tráfego flexível com acesso a só dois caminhos.
- (ii) Tráfego flexível com acesso a três caminhos.

A proporção de tráfego flexível acessando uma ou outra célula será determinada pela estratégia de roteamento adotada. Para cada estado possível do sistema temos que conhecer o desbalanceamento entre os tráfegos das três células, a área de sobreposição entre elas, determinado-se assim os coeficientes de probabilidade de transição. Todo este processo está detalhado na referência [6].

3.4.3 - Medidas de Desempenho.

No caso do sistema de três células adjacentes, existem sete tipos de tráfego experimentando sete tipos de probabilidade de bloqueio, tais que

- (i) T_1 - tráfego bloqueado se somente a célula 1 está bloqueada.
- (ii) T_2 - tráfego bloqueado se somente a célula 2 está bloqueada.
- (iii) T_3 - tráfego bloqueado se somente a célula 3 está bloqueada.
- (iv) T_{12} - tráfego bloqueado se somente as células 1 e 2 estão bloqueadas.
- (v) T_{23} - tráfego bloqueado se somente as células 2 e 3 estão bloqueadas.
- (vi) T_{13} - tráfego bloqueado se somente as células 1 e 3 estão bloqueadas.
- (vii) T_{123} - tráfego bloqueado se as células 1, 2 e 3 estão bloqueadas.

Podemos relacionar estes tráfegos bloqueados com o tráfego gerado no sistema, para as estratégias de encaminhamento baseadas no estado intântaneo das células, como:

$$T_i = A_i, T_{ij} = A_{ij}, T_{jk} = A_{jk} \text{ e } T_{123} = A_{123}, \text{ onde } i, j, k = 1, 2, 3 \quad (3.18)$$

As probabilidades de bloqueio respectivas são relacionadas como processo markoviano como

$$B_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{ijN}, B_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N p_{iNk} \text{ e } B_3 = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N p_{Njk} \quad (3.19.a)$$

$$B_{12} = \sum_{i=1}^N p_{iNN}, B_{23} = \sum_{k=1}^N p_{NNk} \text{ e } B_{13} = \sum_{j=1}^N p_{NjN} \quad (3.19.b)$$

$$B_{123} = p_{NNN} \quad (3.20.c)$$

Assim a probabilidade de bloqueio média do sistema é dada por :

$$B_m = \frac{1}{A} (T_1 B_1 + T_2 B_2 + T_3 B_3 + T_{12} B_{12} + T_{23} B_{23} + T_{13} B_{13} + T_{123} B_{123}) \quad (3.20)$$

3.5 - Desempenho em Presença de Encaminhamento Alternativo.

Como mencionamos anteriormente, adotaremos a estratégia IAP para simularmos o comportamento do sistema frente à variação de parâmetros como flexibilidade e tráfego, na presença da técnica de encaminhamento alternativo. O algoritmo desenvolvido por Yacoub [6] aceita duas opções possíveis na estratégia de decisão. O algoritmo pode trabalhar com a opção de dois ou três caminhos alternativos.

Vamos utilizar o modelo de três células adjacentes para o nosso estudo. Os resultados obtidos serão utilizados posteriormente na determinação da probabilidade de interferência de canal adjacente (ICA) em relação aos parâmetros de tráfego.

Nestas simulações faremos uma simplificação no modelo, considerando que as células estão balanceadas (β nulo). A restrição ao desbalanceamento afetará o resultado obtido relativamente às probabilidades de ICA.

De fato estaremos simplificando em muito o estudo, dando ênfase à influência da técnica sobre a distribuição de tráfego e conseqüente probabilidade de bloqueio. A inclusão do desbalanceamento poderá ser feito sem grandes dificuldades, sendo esta uma proposta de trabalhos futuros.

A proporção γ de área de sobreposição, se considerarmos as unidades móveis distribuídas uniformemente pela célula, será também a proporção de tráfego passível de encaminhamento alternativo, ou seja, tráfego flexível, conforme (3.6). Portanto, γ nos dá a idéia da flexibilidade do sistema.

A seguir estão plotados alguns resultados, mostrando a influência desta flexibilidade em conjunto com a técnica de encaminhamento alternativo IAP, sobre as probabilidades de bloqueio do sistema.

A Figura 3.5 mostra a influência da flexibilidade γ sobre a probabilidade de bloqueio médio calculado entre as três células, que diminui com o aumento da flexibilidade. Note que existem diferenças entre os resultados obtidos na probabilidade de bloqueio médio para a mesma carga (A_{Erl}), dependendo se utilizamos a opção 0 (dois caminhos) ou opção 1 (três caminhos) na estratégia do algoritmo de encaminhamento alternativo IAP. Verificamos que a opção de três caminhos sempre oferece um desempenho melhor em relação à opção de dois caminhos.

Na Figura 3.6 temos a probabilidade de bloqueio médio em função do tráfego total A_{Erl} do sistema, para alguns valores de flexibilidade. Novamente a opção de três caminhos se revelou superior, exceto para o caso de flexibilidade nula, onde não há diferenças entre as opções já que a área de sobreposição é nula. Neste caso, esta probabilidade de bloqueio médio é dada pela fórmula de Erlang -B para cada célula.

Na Figura 3.7 temos o bloqueio por célula em função da flexibilidade. Note que acima de uma certa carga no sistema, o bloqueio por célula B começa a aumentar juntamente com a flexibilidade γ . Isto é explicado pelo fato do tráfego fixo começar a sofrer concorrência pelo acesso aos canais de sua própria célula por unidades da célula vizinha, que estejam na área de tráfego flexível, o que logicamente aumenta a probabilidade de bloqueio por célula.

BLOQUEIO MEDIO x FLEXIBILIDADE

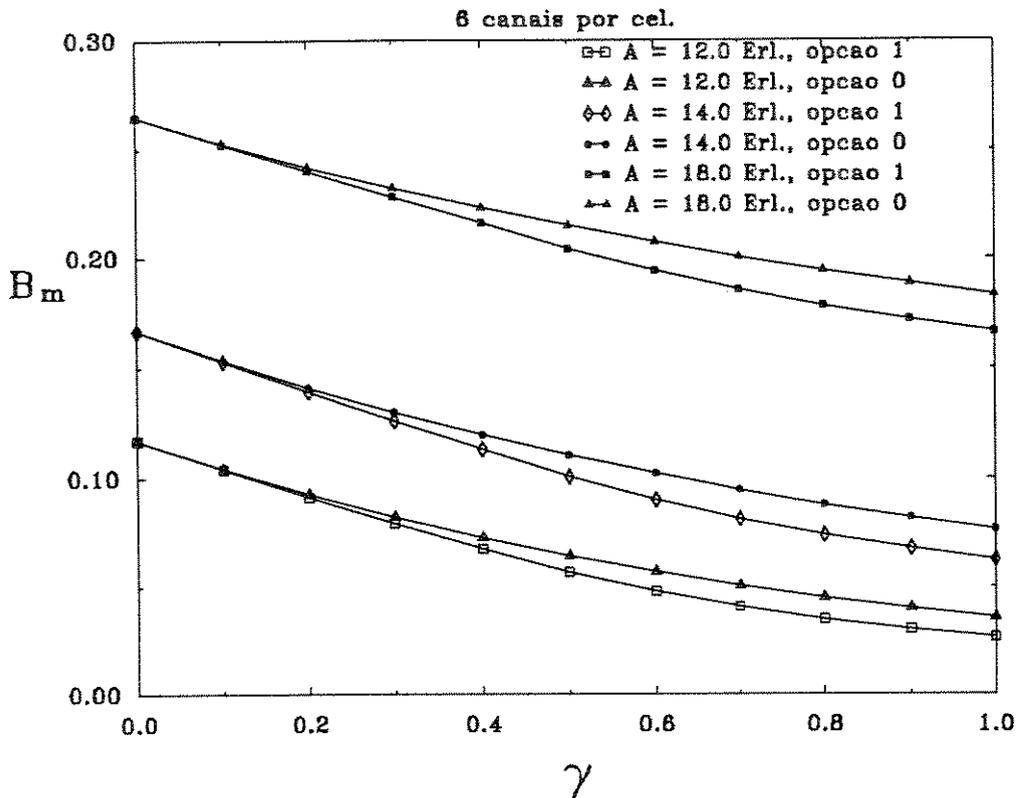


Fig. 3.5

BLOQUEIO MEDIO x TRAFEGO

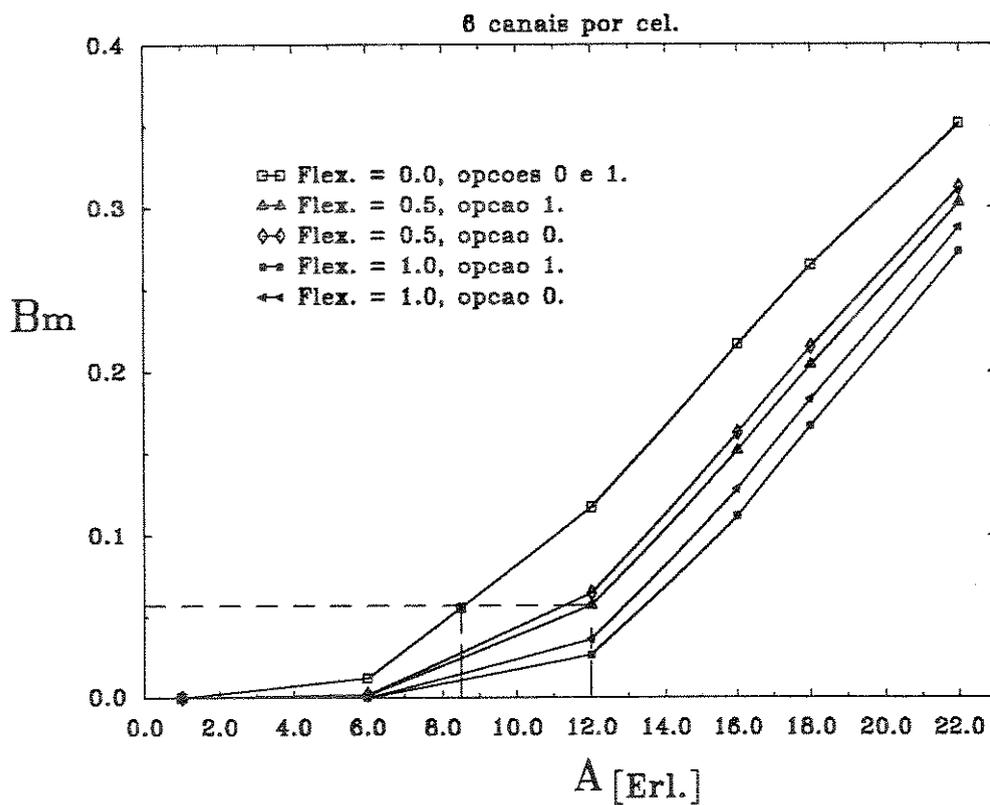


Fig 3.6

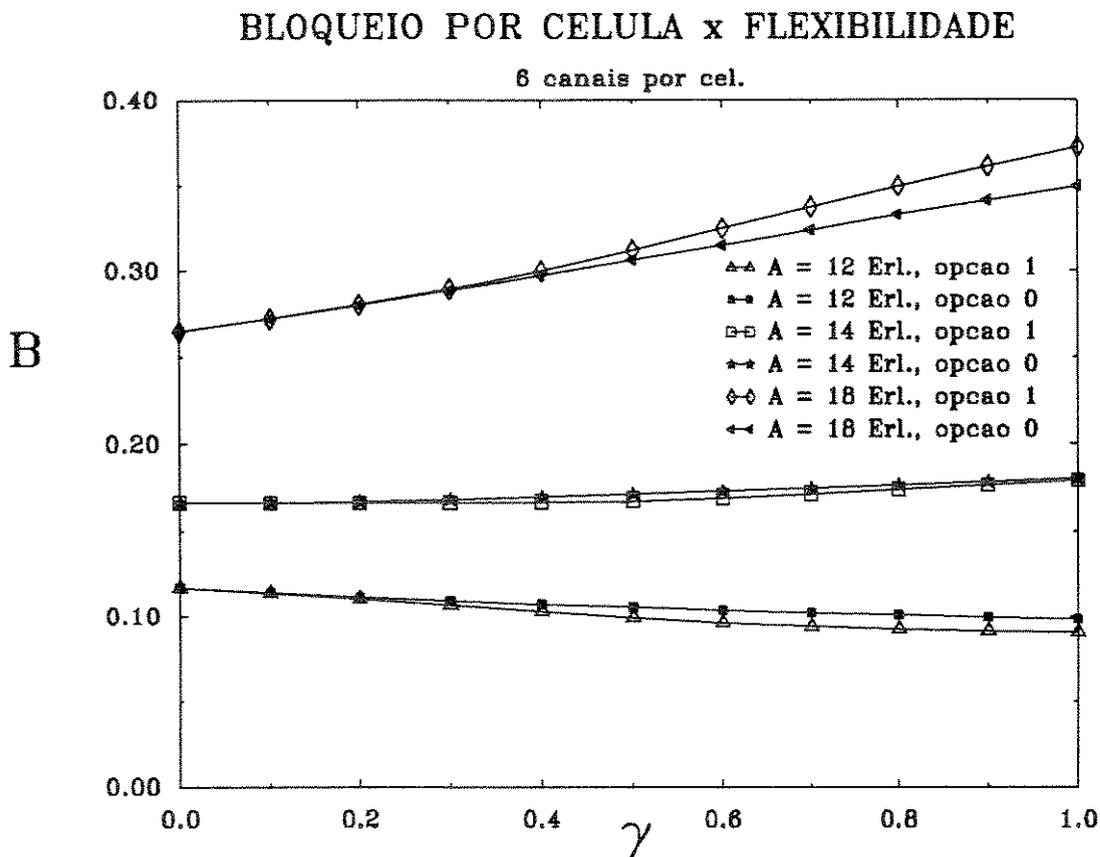


Fig. 3.7

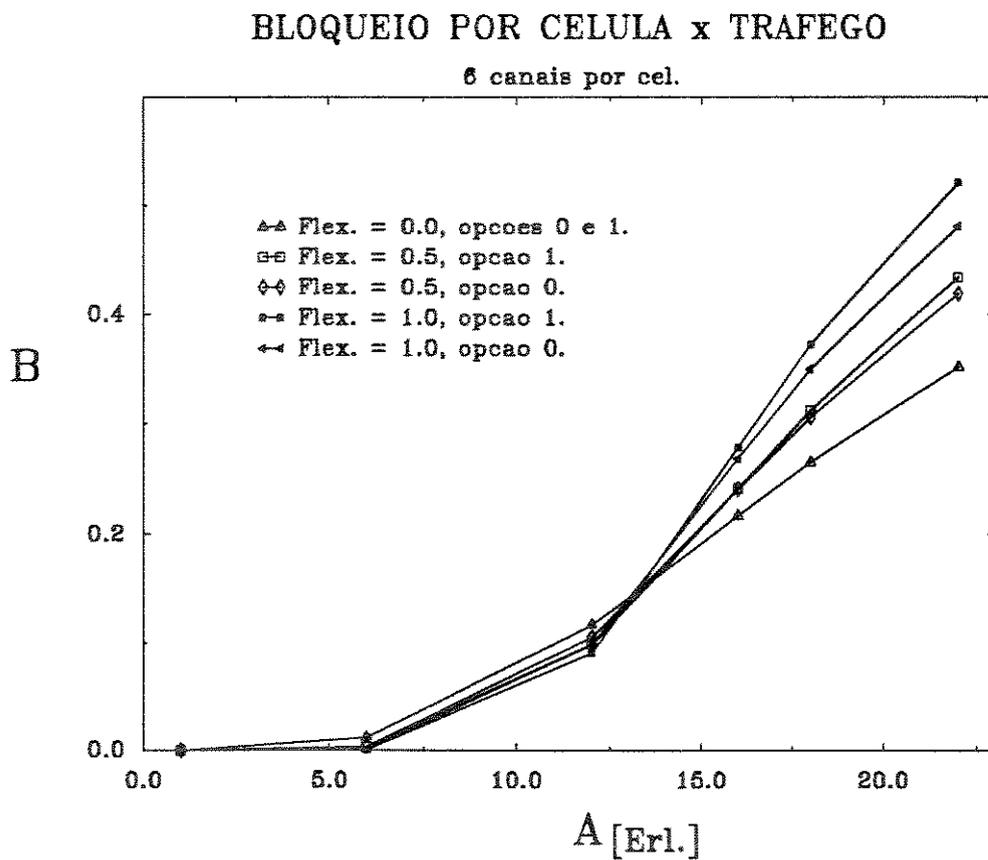


Fig. 3.8

Isto explica também o porque do melhor desempenho da opção de dois caminhos nestes casos, pois o tráfego fixo sofre uma concorrência menor que no caso de três caminhos, onde consideramos o tráfego flexível de três células. Note que para $A = 14.0$ erl. as duas opções apresentam praticamente o mesmo desempenho.

Na figura 3.8 temos o bloqueio por célula B em função do tráfego, para vários γ 's. Note o ponto de inversão entre as probabilidades quando a carga do sistema se aproxima de 15 erl., resultado da concorrência entre o tráfego flexível e o fixo, como já explicamos.

3.6 - Sumário e Conclusões.

Com base nos valores significativos das áreas de sobreposição entre células adjacentes determinados no Capítulo 2, e conseqüente número de usuários com acesso à mais de uma ERB, torna-se interessante a aplicação de técnicas de encaminhamento alternativo sobre o tráfego gerado nestas áreas de sobreposição. As estratégias de encaminhamento diferem na utilização de informações como o estado de ocupação dos canais e o tráfego médio do sistema. O processo de tráfego do sistema é modelado por cadeias de Markov, e a partir dos parâmetros de transmissão e das densidades de transição entre estados do sistema é possível construir uma matriz de coeficientes para o algoritmo de decisão de encaminhamento das chamadas flexíveis entre duas ou três células adjacentes.

Neste estudo utilizamos em particular a técnica IAP [6], onde não se tem informação sobre o tráfego médio do sistema. Pode-se observar na Figura 3.6 a melhoria do desempenho do sistema em presença do encaminhamento. Note que, por exemplo, para um grau de serviço de 6 % (probabilidade de bloqueio de 6 %) existe um aumento aproximado de 50 % na capacidade de tráfego do sistema para uma flexibilidade de 50 %. (veja Figura 3.6)

CAPÍTULO 4

INTERFERÊNCIA DE CANAL ADJACENTE

Em sistemas rádio móveis celulares com transmissão em banda estreita, a interferência de canal adjacente (ICA) ocorre pela utilização em uma mesma célula ou células vizinhas de canais em frequências adjacentes. Neste capítulo, vamos estudar esta interferência sob um novo ponto de vista, isto é, vamos estudar a probabilidade de ocorrência de interferência de canal adjacente em função (i) dos parâmetros de propagação do sinal em ambientes com presença de desvanecimentos tipo Log-Normal e Rayleigh, e (ii) da distribuição de tráfego do sistema.

Nestes casos, consideraremos a existência de áreas de sobreposição entre as células vizinhas, e a utilização de técnicas de encaminhamento alternativo para o tráfego nestas regiões. Estes tópicos foram explorados nos Capítulos 2 e 3, sendo empregados resultados e definições destes para o tratamento das probabilidades de ICA, tanto com respeito à unidade móvel dentro da célula, quanto à própria estação rádio base (ERB) da célula.

4.1 Interferência de Canal Adjacente em Sistemas Celulares.

Nos atuais sistemas rádio móveis celulares, o espectro disponível para se distribuir entre os canais de voz e controle é muito limitado. Para se otimizar o sistema em termos de número de canais em espectro, estes canais são alocados muito próximos entre si.

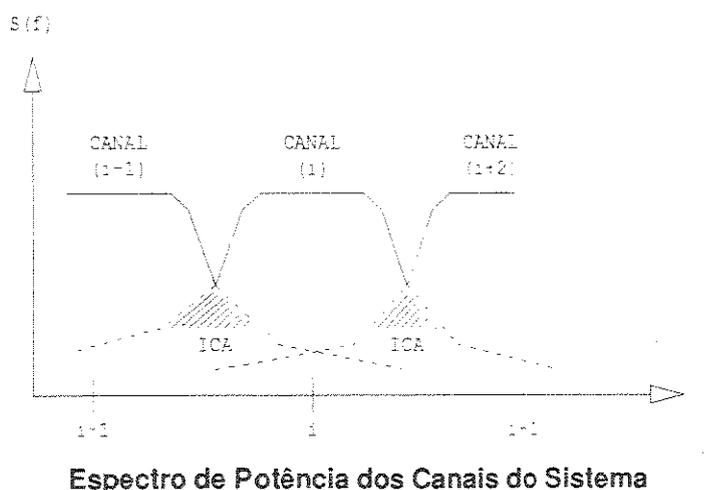


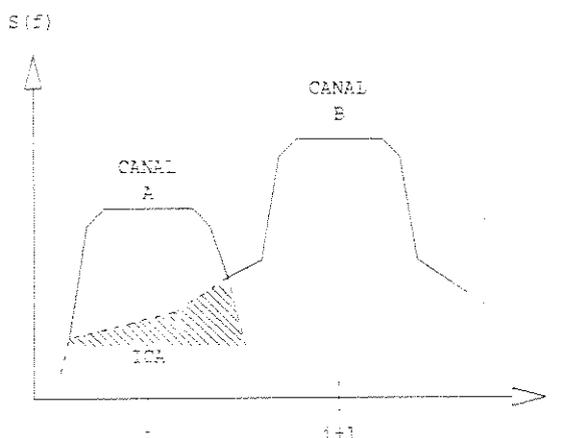
Fig. 4.1

Esta proximidade entre canais degrada a qualidade de transmissão e operação do sistema devido ao aumento das interferências, como intermodulações e a interferência de canal adjacente. Na realidade, um canal de rádio ativo não concentra toda a energia transmitida dentro da faixa de frequências alocada. Isto ocorre pelas limitações físicas e tecnológicas dos equipamentos utilizados nos sistemas rádio móveis celulares. Podemos citar vários fatores que contribuem para a ICA, entre eles a limitação física dos filtros de transmissão e recepção, que não possuem rejeição infinita às componentes em frequência nas regiões fora da banda de passagem permitida. Assim componentes residuais da transmissão de um canal estarão presentes como ruído ou interferência justamente sobre os canais laterais superior e inferior. (ver Figura 4.1)

Outro fator de acirramento da ICA é a utilização de modulações com baixa eficiência espectral. Estas modulações não conseguem concentrar a energia transmitida em uma banda muito estreita. A modulação em FM sempre teve a vantagem de ser um projeto de implementação simples e econômica, conseguindo um bom desempenho em relação a razão sinal/ruído. Mesmo existindo modulações mais otimizadas, algumas podendo até usar frações da banda utilizada por um canal FM como a SSB (Single-SideBand) e ACSSB (Amplitude Companding SSB), os fatores de simplicidade e economia aliados ao desempenho no ambiente móvel sempre foram considerados mais importantes do que a eficiência espectral. Isto pelo menos na fase de implantação da primeira geração de sistemas rádio móveis celulares.

Fatores como amplificadores de potência não lineares na transmissão e recepção, desvios de frequência dos sintetizadores utilizados nos equipamentos, e combinadores de RF com baixa isolamento entre canais, utilizados nas ERB's, também contribuem com a ocorrência de ICA. Por exemplo, um sintetizador com tolerância de 2,5 ppm em 960 MHz, pode produzir desvios da frequência da portadora em +/- 2.4 kHz, o que pode ser representativo para uma largura de faixa de um canal de 30 kHz como utilizado no sistema AMPS.

Para sistemas celulares, o tratamento da interferência de canal adjacente apresenta maior grau de dificuldade. Em primeiro lugar, o canal de rádio móvel pode ser considerado "mal-comportado", ou seja, com um alto grau de imprevisibilidade, devido às flutuações estatísticas nos níveis dos sinais causados pelos desvanecimentos caracterizados pelo sombreamento e também multipercurso. Por exemplo, suponha um canal A com desvanecimento, e seu vizinho B, sem desvanecimento. Note, à título de ilustração como na Figura 4.2, como a ICA pode se tornar significativa.



ICA entre canais sujeitos a diferentes desvanecimentos.

Fig. 4.2

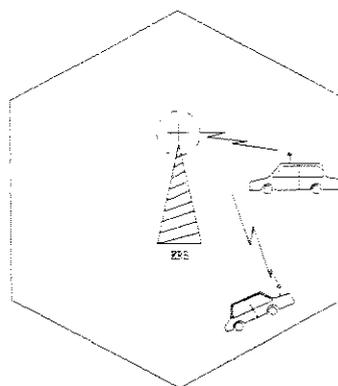
Por outro lado, a melhoria dos circuitos dos equipamentos (filtros, moduladores, etc), para amenizar o problema, implicaria no encarecimento do sistema, o que esbarra na filosofia de se produzir equipamentos cada vez mais baratos para maior disseminação dos sistemas celulares. Entretanto, cabe-nos ressaltar o esforço que as empresas fornecedoras têm feito no sentido de fabricar em larga escala componentes e equipamentos cada vez mais complexos, miniaturizados e com menores preços.

4.1.1 -Interferência de Canal Adjacente Intra-Célula.

Na distribuição das unidades móveis dentro de uma célula, algumas estarão muito próximas à ERB e outras próximas às fronteiras da célula. Se permitirmos a operação de canais em frequências adjacentes nesta célula, uma unidade móvel que transmitisse próxima a ERB, forneceria um sinal com potência maior na recepção desta ERB, podendo até saturar o amplificador logaritmico de recepção de FI.

Ao mesmo tempo, uma outra unidade móvel que transmitisse em canal adjacente de uma região mais distante, como a fronteira da célula, teria um sinal com uma potência bem mais baixa, devido às perdas de percurso na recepção da ERB. Então este sinal mais fraco poderia sofrer uma grande interferência do sinal transmitido no canal adjacente pela unidade mais próxima à ERB. Esta é a chamada interferência de canal adjacente intra-célula. (ver Figura 4.3)

Este tipo de ICA pode ser evitada pela não utilização de canais em frequências adjacentes em uma mesma célula. De fato é aconselhável espaçar os canais de uma mesma célula de uma distância maior que apenas um canal para minimizar os efeitos da interferência de canais adjacentes. Além disso pode-se utilizar um combinador de RF na ERB com uma boa isolamento entre os canais.



Interferência Intra-Celular

Fig. 4.3

4.1.2 - Interferência de Canal Adjacente Inter-Célula.

Quando existirem canais adjacentes operando em células vizinhas em um "cluster", provavelmente ocorrerá interferência de canal adjacente. Se considerarmos o caso de duas unidades móveis transmitindo próximas à fronteira entre duas células vizinhas, a estação rádio

base de cada célula irá receber, conforme Fig 4.1, o canal desejado adicionado a uma certa interferência de canal adjacente, além do ruído do canal.

Como ambos os sinais transmitidos pelas unidades móveis sofrem a ação aleatória e descorrelatada dos desvanecimentos presentes nos diferentes caminhos de propagação, então pode ocorrer o caso do sinal interferente sobrepujar o sinal desejado. A interferência de canal adjacente inter-célula poderia ser evitada simplesmente não se permitindo a utilização de canais adjacentes em células vizinhas. Contudo, na prática, pode não ser possível evitar este problema.

Por exemplo, um "cluster" com 7 células, canais adjacentes são forçosamente alocados às células adjacentes.

4.2 - Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente Inter-celular

Nesta seção vamos estudar a probabilidade de ocorrência de interferência de canal adjacente, com intuito de determinar a proporção de unidades móveis que terão seus problemas de interferência afetados, devido às suas posições instantâneas relativamente às ERB's do sistema. Por outro lado, vamos determinar também o incremento da probabilidade de interferência de canal adjacente sobre estas mesmas ERB's em função da posição das unidades móveis das células vizinhas.

Vamos estimar a probabilidade de interferência de canal adjacente inter-celular como função dos parâmetros de propagação e da distribuição de tráfego do sistema, considerando que os receptores são ideais.

Podemos visualizar a importância do estudo se lembrarmos os resultados do Capítulo 2, onde comentamos que as regiões de sobreposição nas fronteiras podem atingir valores significativos (mais de 40 % da célula). Um benefício deste fato é a possibilidade de se utilizar técnicas de encaminhamento alternativo para diminuir o bloqueio médio do sistema, como visto no Capítulo 3. Por outro lado deve existir um aumento da interferência de canal adjacente.

A interferência de canal adjacente ocorre em duas situações distintas. Uma destas seria quando as unidades móveis estão operando próximas às fronteiras entre células vizinhas, dentro da região de sobreposição, conseqüentemente com acesso a mais de uma ERB. Provavelmente estas unidades experimentarão um aumento significativo na interferência de canal adjacente. Outra possível situação é o aumento da interferência sobre a ERB, isto quando uma unidade móvel estiver transmitindo de uma região de sinal fraco dentro da própria célula, e uma unidade móvel da célula vizinha estiver transmitindo em canal adjacente próxima à fronteira entre as células.

A fim de investigar estes possíveis casos de ICA é necessária a definição de alguns parâmetros . Seja um canal i qualquer operando numa célula, e sejam $(i-1)$ e $(i+1)$ os correspondentes canais adjacentes inferior e superior presentes em células vizinhas. Então definimos :

- P_1 - Probabilidade de ocorrência de só um canal adjacente ativo em célula vizinha.
- P_2 - Probabilidade de ocorrência de dois canais adjacentes ativos em uso simultâneo em células vizinhas.

- γ - Proporção de unidades móveis com comunicação adequada a duas ou mais ERB's.
- δ - Proporção de unidades móveis com comunicação adequada a três ou mais ERB's.
- μ_x^c - Proporção de unidades móveis dentro da área de sinal fraco da célula, ou seja, com nível de sinal abaixo de um certo limiar na recepção. Onde $x = T$ ou R , respectivamente ambientes Rayleigh ou Log-Normal.

Os parâmetros P_1 , P_2 , γ , δ e μ_x^c constituem distribuições de probabilidade. As probabilidades, P_1 e P_2 são funções da distribuição de tráfego e do algoritmo de alocação de canais do sistema. Por outro lado as probabilidades μ_x^c , γ e δ são diretamente relacionadas com a potência média do sinal, como visto no Capítulo 2.

Observe que μ_x^c é uma função complementar de μ_x , tal que $\mu_x = 1 - \mu_x^c$, onde μ_x é a proporção de área de cobertura da célula com potência recebida acima do limiar, como descrita no Capítulo 2. Podemos concluir ainda, com base nas definições acima, a proporção de unidades móveis com acesso a somente duas ERB's é dada por $(\gamma - \delta)$.

Para melhor entendimento, relacionar-se-ão as probabilidades γ , δ e μ_x^c com a distribuição geográfica das unidades móveis dentro de uma célula. Com base na Figura 4.4, vê-se que em um arranjo de células hexagonais δ é a probabilidade que uma unidade móvel esteja nas proximidades das fronteiras de três células mutuamente adjacentes, por exemplo região 1, 3 ou 5 da referida figura. Assim como existem 6 possíveis regiões de fronteira entre três células, então a probabilidade de uma unidade móvel estar numa determinada região com acesso a 3 ERB's é dada por $\delta/6$.

A probabilidade $(\gamma - \delta)$ de uma unidade móvel experimentar comunicação com somente duas ERB's ocorre dentro das regiões 2 e 4 por exemplo. Semelhantemente, a probabilidade de uma unidade móvel estar numa destas regiões é dada por $(\gamma - \delta)/6$. Finalmente a probabilidade de uma unidade móvel estar numa região de sinal fraco é dada por μ_x^c . Agora vamos estudar os dois casos possíveis de ICA mencionados anteriormente.

4.2.1 - Interferência de Canal Adjacente Sobre a Unidade Móvel.

A interferência de canal adjacente inter-celular é mais provável de ocorrer quando a unidade móvel estiver operando um canal i proximamente às bordas da célula, ou seja, provavelmente experimentando boa comunicação com mais de uma ERB.

Assim uma ERB vizinha que esteja utilizando um canal adjacente, $(i+1)$ ou $(i-1)$, provocará uma forte interferência de canal adjacente sobre esta unidade móvel. Agora com base na Figura 4.4, vamos estudar os casos de interferência por um ou dois canais adjacentes.

4.2.1.1- Um Canal Adjacente Ativo.

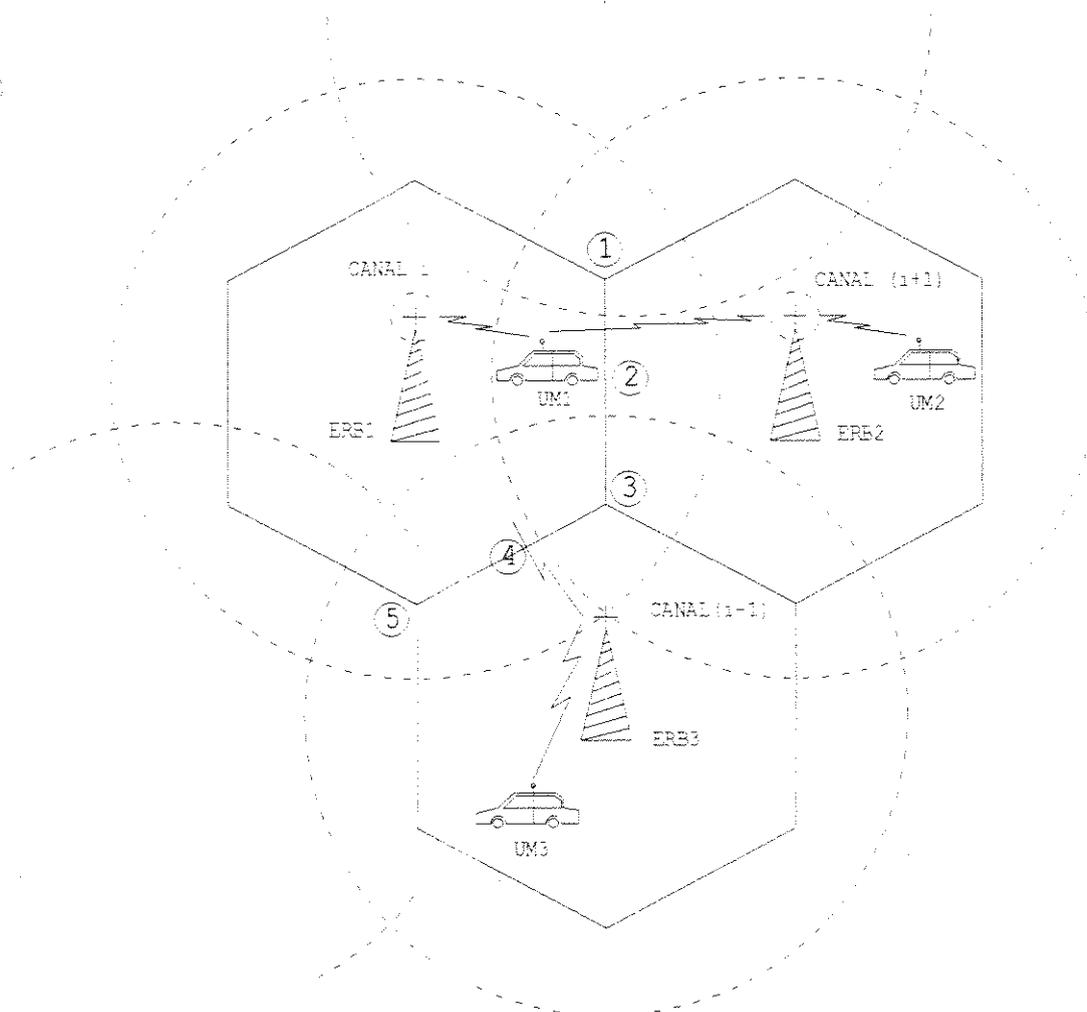
Seja o canal i ativo numa determinada célula. Seja um dos canais adjacentes, $(i-1)$ ou $(i+1)$, ativos numa das células adjacentes. Vamos considerar este evento com probabilidade P_1 . Assumimos que a unidade móvel UM_1 está utilizando o canal i , enquanto a unidade UM_2 utiliza o canal adjacente $(i+1)$ ou a unidade UM_3 utiliza o canal adjacente $(i-1)$.

Agora, a probabilidade de ICA será mais provável se ocorrer um destes eventos :

- UM_1 estiver localizada na região 1 (evento com probabilidade $\delta/6$), ou
- UM_1 estiver localizada na região 2 (evento com probabilidade $(\gamma - \delta)/6$), ou
- UM_1 estiver localizada na região 3 (evento com probabilidade $\delta/6$)

Logo a probabilidade de ICA com um canal adjacente ativo, $Prob_1$, é dada por :

$$Prob_1 = P_1 \left(\frac{\gamma - \delta}{6} + \frac{2\delta}{6} \right) \quad (4.1)$$



Interferência sobre a Unidade Móvel.

Fig. 4.4

4.2.1.2 - Dois Canais Adjacentes Ativos.

Analogamente, mas assumindo que os canais (i-1) e (i+1) estão simultaneamente ativos, um evento com probabilidade P₂, a interferência será mais provável de ocorrer se:

- UM₁ estiver localizada na região 1 (evento com probabilidade $\delta/6$), ou
- UM₁ estiver localizada na região 2 (evento com probabilidade $(\gamma - \delta)/6$), ou
- UM₁ estiver localizada na região 3 (evento com probabilidade $\delta/6$. Mas, dois canais adjacentes devem interferir simultaneamente, então o evento contribui com $2 \delta/6$), ou
- UM₁ estiver localizada na região 4 (evento com probabilidade $(\gamma - \delta)/6$), ou
- UM₁ estiver localizada na região 5 (evento com probabilidade $\delta/6$.)

A probabilidade de ICA, Prob₂, com dois canais adjacentes ativos é dada por :

$$Prob_2 = P_2 \left(2 \frac{\gamma - \delta}{6} + 4 \frac{\delta}{6} \right) \quad (4.2)$$

A interferência de canal adjacente total sobre a unidade móvel é dada pela soma das probabilidades Prob₁ e Prob₂ :

$$P_M = P_1 \left(\frac{\gamma - \delta}{6} + 2 \frac{\delta}{6} \right) + P_2 \left(2 \frac{\gamma - \delta}{6} + 4 \frac{\delta}{6} \right) \quad (4.3)$$

Ou ainda:

$$P_M = \left(\frac{\gamma + \delta}{3} \right) \left(\frac{P_1 + 2 P_2}{2} \right) = \left(\frac{\gamma + \delta}{3} \right) I_A \quad (4.4)$$

onde

$$I_A = \frac{P_1 + 2 P_2}{2}$$

define o índice de adjacência .

4.2.2 - Interferência de Canal Adjacente Sobre a ERB.

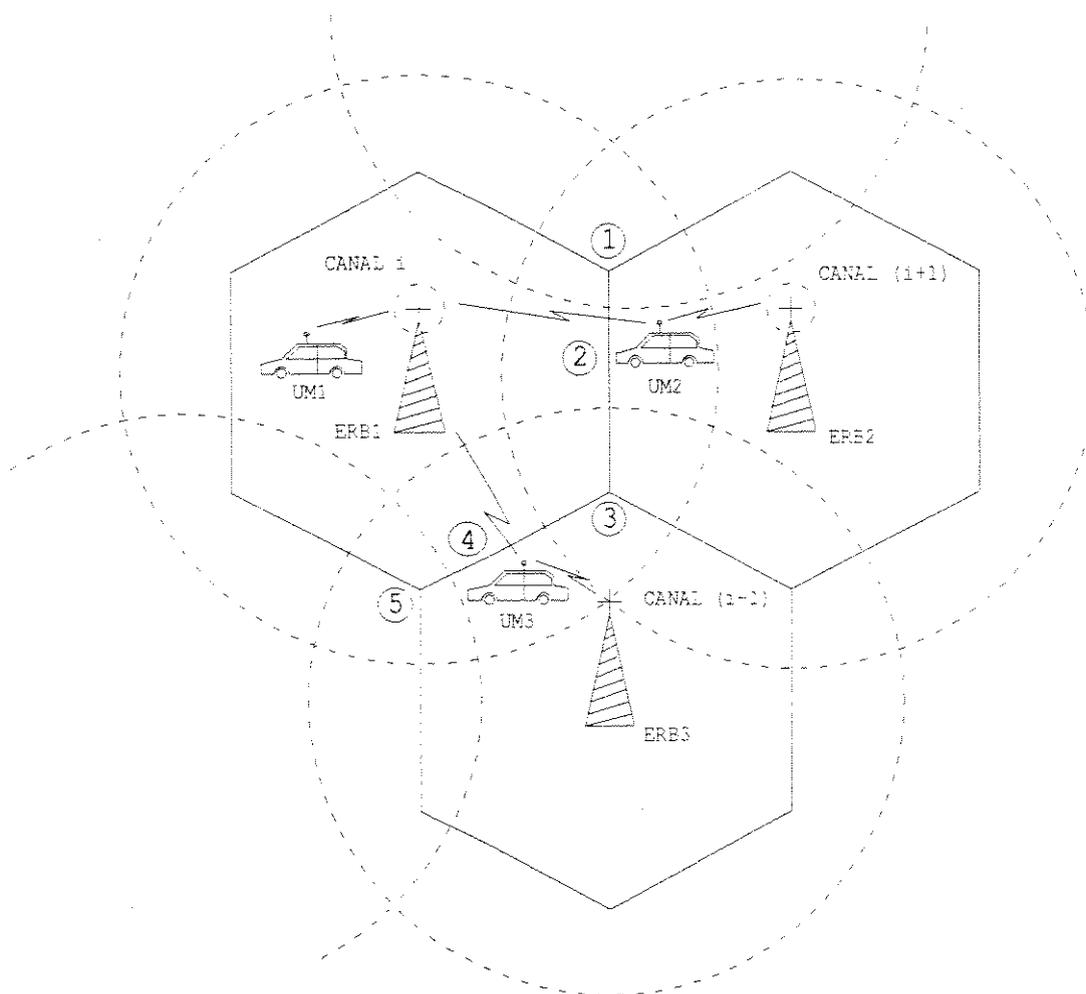
A interferência de canal adjacente sobre a estação rádio base de uma célula é mais provável de ocorrer quando uma unidade móvel desta célula estiver transmitindo de uma área de sinal fraco e ao mesmo tempo existirem uma ou duas unidades móveis transmitindo em canais adjacentes em áreas de sobreposição nas células vizinhas, conforme Figura 4.5.

Novamente vamos considerar os casos de um ou dois canais adjacentes interferentes, além de considerarmos que a unidade móvel pertencente a ERB em estudo está transmitindo de uma área de sinal fraco, um evento com probabilidade μ_x^c .

4.2.2.1 - Um Canal Adjacente Ativo.

Analogamente ao item 4.2.1.1 e levando-se em consideração a proporção de área com sinal abaixo do limiar μ_x^c , temos que o evento possui a seguinte probabilidade:

$$Prob1 = \mu_x^c P_1 \left(\frac{\gamma - \delta}{6} + 2 \frac{\delta}{6} \right) \quad (4.5)$$



Interferência sobre a ERB.

Fig. 4.5

4.2.2.2 - Dois Canais Adjacentes Ativos.

Este caso exige uma análise mais complexa, pois existem várias situações possíveis. Estas situações são baseadas na Figura 4.5 e estão mostradas na tabela 4.1.

UM ₂ está na região	UM ₃ está na região	Número de Interferentes	Probabilidade do evento
1	3	2	$2(\delta/6)^2$
1	4	2	$2(\delta/6)(\gamma-\delta)/6$
1	5	2	$2(\delta/6)^2$
1	X	1	$(\delta/6)(1-(\gamma+\delta)/6)$
2	3	2	$2(\delta/6)(\gamma-\delta)/6$
2	4	2	$2((\gamma-\delta)/6)^2$
2	5	2	$2(\delta/6)(\gamma-\delta)/6$
2	X	1	$((\gamma-\delta)/6)(1-(\gamma+\delta)/6)$
3	3	2	$2(\delta/6)^2$
3	4	2	$2(\delta/6)(\gamma-\delta)/6$
3	5	2	$2(\delta/6)^2$
3	X	1	$(\delta/6)(1-(\gamma+\delta)/6)$
X	3	1	$(\delta/6)(1-(\gamma+\delta)/6)$
X	4	1	$((\gamma-\delta)/6)(1-(\gamma+\delta)/6)$
X	5	1	$(\delta/6)(1-(\gamma+\delta)/6)$

Tabela 4.1

onde x indica uma situação irrelevante.

E a probabilidade de ICA para dois canais adjacentes é dada por:

$$Prob_2 = \mu_x^c P_2 \sum (\text{Prob. tabela 4.1}) = \mu_x^c P_2 \left(\frac{2\delta + 2\gamma}{6} \right) \quad (4.6)$$

A interferência de canal adjacente sobre a ERB irá ocorrer com a probabilidade P_B dada pela soma de Prob 1 e Prob 2 . Assim

$$P_B = \mu_x^c P_1 \left(\frac{\gamma - \delta}{6} + 2 \frac{\gamma}{6} \right) + \mu_x^c P_2 \left(\frac{2\gamma + 2\delta}{6} \right) \quad (4.7)$$

ou ainda :

$$P_B = \mu_x^c \left(\frac{\gamma + \delta}{3} \right) \left(\frac{P_1 + 2P_2}{2} \right) = \mu_x^c \left(\frac{\gamma + \delta}{3} \right) I_A \quad (4.8)$$

Devemos observar que γ e δ não são probabilidades independentes, e esta relação pode ser aproximada por [6] , como visto no Capítulo 2.

$$\delta \approx 1.25 \gamma^2 \quad 0.0 \leq \delta < 0.8$$

$$\delta \approx \gamma \quad 0.8 \leq \delta \leq 1.0$$

Como discutimos no Capítulo 2, as probabilidades γ e δ dependem das posições geográficas dentro das quais as perdas entre os diferentes caminhos de propagação estarão dentro de alguma tolerância (T dB) permitida. Logo, como já fizemos, γ e δ podem ser escritos como funções desta tolerância (T dB). A probabilidade μ_x^c da unidade móvel estar transmitindo em uma região dentro da célula com sinal de potência abaixo de um limiar pré-estabelecido, também depende da posição geográfica da unidade. Podemos escrever esta probabilidade em função deste limiar W_T e da potência média M_w . Contudo, esta probabilidade independe das áreas de sobreposição γ e δ , dependendo somente das perdas impostas por ambientes com desvanecimento Log-Normal e Rayleigh e do limiar de recepção pré-estabelecido.

As probabilidades P_1 e P_2 são interdependentes, tal que o índice de adjacência I_A varia entre 0 e 1. Por exemplo, se todos os canais estão ativos temos $P_1=0$, $P_2=1$ e $I_A =1$; mas para nenhum canal ativo temos $P_1=0$, $P_2=0$ e $I_A =0$.

4.3 -Relações entre a Probabilidade de ICA e os Parâmetros de Propagação.

A probabilidade μ_x^c do nível do sinal estar abaixo de um limiar na recepção pode ser obtida diretamente das Figuras 2.1 e 2.2, fazendo a simples operação $\mu_x^c = 1 - \mu_x$, onde μ_x é justamente a probabilidade do sinal estar acima de um limiar pré-estabelecido. As probabilidades γ e δ como funções da tolerância (T dB) entre a potência do sinal de duas ou três ERB's podem ser retiradas das Figuras 2.6, 2.7 e 2.8, dependendo do ambiente adotado.

As probabilidades de ICA sobre a unidade móvel, P_M , e sobre a ERB , P_B , podem ser plotadas como função destas tolerâncias e do limiar. Considere o eixo x a tolerância em dB's entre os sinais oriundos de pelo menos duas ERB's vizinhas, e sendo o eixo y as probabilidades P_M e P_B (normalizadas pelo índice de adjacência I_A). Assim utilizando (4.4) e (4.8) juntamente com as figuras citadas temos as curvas plotadas na Figura 4.6.

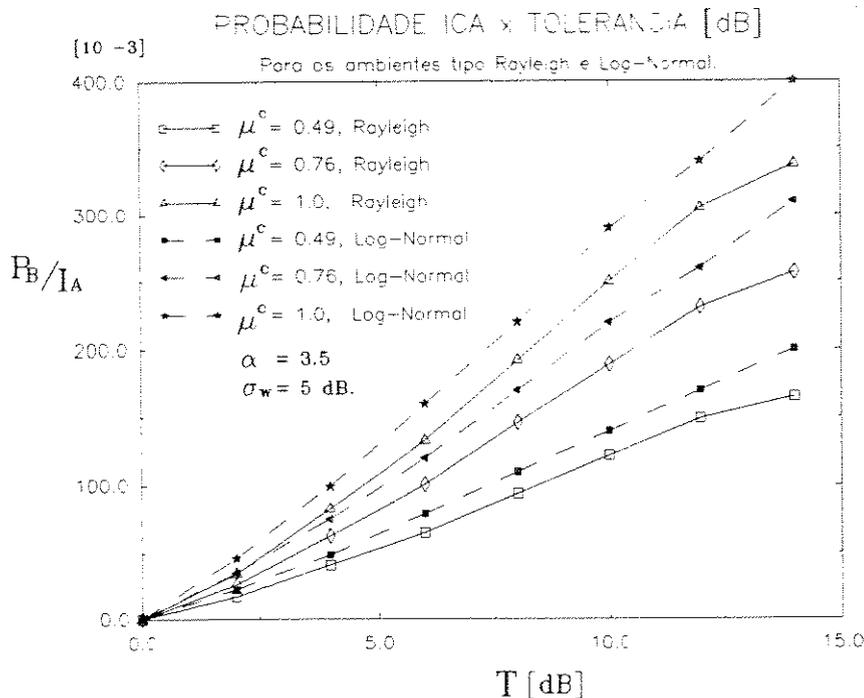


Fig. 4.6

Quando consideramos um limiar muito alto, ou seja $\mu_x^c=1$ com todas as unidades móveis transmitindo de áreas consideradas de sinal fraco, temos $P_B=P_M$. Na Figura 4.6, estão plotadas as probabilidades de ICA sobre a ERB como função da tolerância (T dB) e tendo μ_x^c como parâmetro. Note que a probabilidade de ICA sobre a unidade móvel é dada pela curva superior onde $\mu_x^c = 1$, já que P_B independe do fator μ_x^c .

Suponha uma tolerância permitida T de 9 dB entre os caminhos de propagação, e que a unidade móvel esteja numa região onde o sinal recebido está abaixo de um limiar $W_T = 6$ dB (evento com probabilidade $\mu_x^c = 1 - \mu_x = 0.49 = 49\%$). Então a probabilidade normalizada de ICA na ERB é $P_B/I_A \cong 10\%$.

Nestas mesmas condições a probabilidade normalizada de ICA sobre a unidade móvel é $P_M/I_A \cong 23\%$, sendo independente de μ_x^c . Estes valores são os máximos possíveis nestas condições, dado que I_A é positivo e menor ou igual a 1. É importante salientar que o índice de adjacência I_A é constituído por P_1 e P_2 , que só dependem da distribuição de tráfego e do algoritmo de alocação de canais do sistema. Para I_A, δ, γ e μ_x^c iguais a unidade, temos o caso de uma única macrocélula. Assim obtemos os valores máximos de P_M e P_B :

$$P_M = 1 \frac{(1 + 1)}{3} = 66.66\%$$

$$P_B = 1 \frac{(1 + 1)}{3} 1 = 66.66\%$$

Esta é a situação mais extrema de probabilidade de ocorrência de ICA no sistema.

4.4 -Relações Entre a Probabilidade de ICA e Distribuição de Tráfego.

Nesta seção iremos tratar das influências da distribuição de tráfego sobre as probabilidades de interferência de canal adjacente. Podemos estimar a distribuição de canais adjacentes ativos em um sistema, considerando primeiramente que a probabilidade de existirem k canais adjacentes ativos seja $p(k)$, onde k pode assumir os valores 0, 1 e 2, dependendo se temos nenhum, um ou dois canais adjacentes ativos. O estado dos canais, i. e., se estão ativos ou não, pode ser descrita pela distribuição de Bernoulli como na expressão (4.9)

$$p(s) = p^s (1-p)^{1-s}, \quad s = 0, 1 \quad (4.9)$$

onde p é a probabilidade da ocorrência de canal ativo, e s representa o estado do canal, assumindo os valores 0 para canal inativo, e 1 para canal ativo. Vamos assumir que os canais são independentes e distribuídos uniformemente pelas células. Então descrevendo os estados dos canais adjacentes inferior e superior por s_1 e s_2 (a ordem é irrelevante) temos:

$$k = s_1 + s_2 \quad (4.10)$$

Assim

- Para $k = 0$ \implies nenhum canal adjacente ativo $\implies p(0) = (1-p)^2$
- Para $k = 1$ \implies um canal adjacente ativo $\implies p(1) = 2p(1-p)$
- Para $k = 2$ \implies dois canais adjacentes ativos $\implies p(2) = p^2$

Desta forma

$$p(k) = \binom{2}{k} p^k (1-p)^{2-k}, \quad k = 0, 1, 2 \quad (4.11)$$

Assumindo que cada célula possua N canais e que o tráfego seja uniformemente distribuído pelo sistema, a probabilidade de bloqueio por célula será única e igual a B .

Assim

$$B = \prod_{i=0}^N p = p^N \quad \text{ou} \quad p = B^{1/N} \quad (4.12)$$

Substituindo (4.12) em (4.11) temos

$$p(k) = \binom{2}{k} B^{k/N} (1 - B^{1/N})^{2-k} \quad (4.13)$$

Agora podemos determinar as probabilidades P_1 , P_2 e I_A , obtidas no item 4.2 .

$$P_1 = p (1) = 2 B^{1/N} (1 - B^{1/N}) \quad (4.14.a)$$

$$P_2 = p (2) = B^{2/N} \quad (4.14.b)$$

$$I_A = \frac{P_1 + 2 P_2}{2} = B^{1/N} = p \quad (4.14.c)$$

Conseqüentemente a relação entre P_1 e P_2 é expressa por :

$$P_1 = 2 \sqrt{P_2} (1 - \sqrt{P_2}) \quad (4.15)$$

P_1, P_2 e I_A estão plotados nas Figuras 4.7.a, 4.7.b, 4.7.c e 4.7.d em função da probabilidade de bloqueio por célula B e tendo o número de canais N como parâmetro. P_1 atinge seu máximo em $B = 0.5^N$, ou seja, para $p=0.5$. Quanto maior o número de canais do sistema maior a probabilidade de interferência, mesmo para baixas taxas de bloqueio, conforme as figuras abaixo.

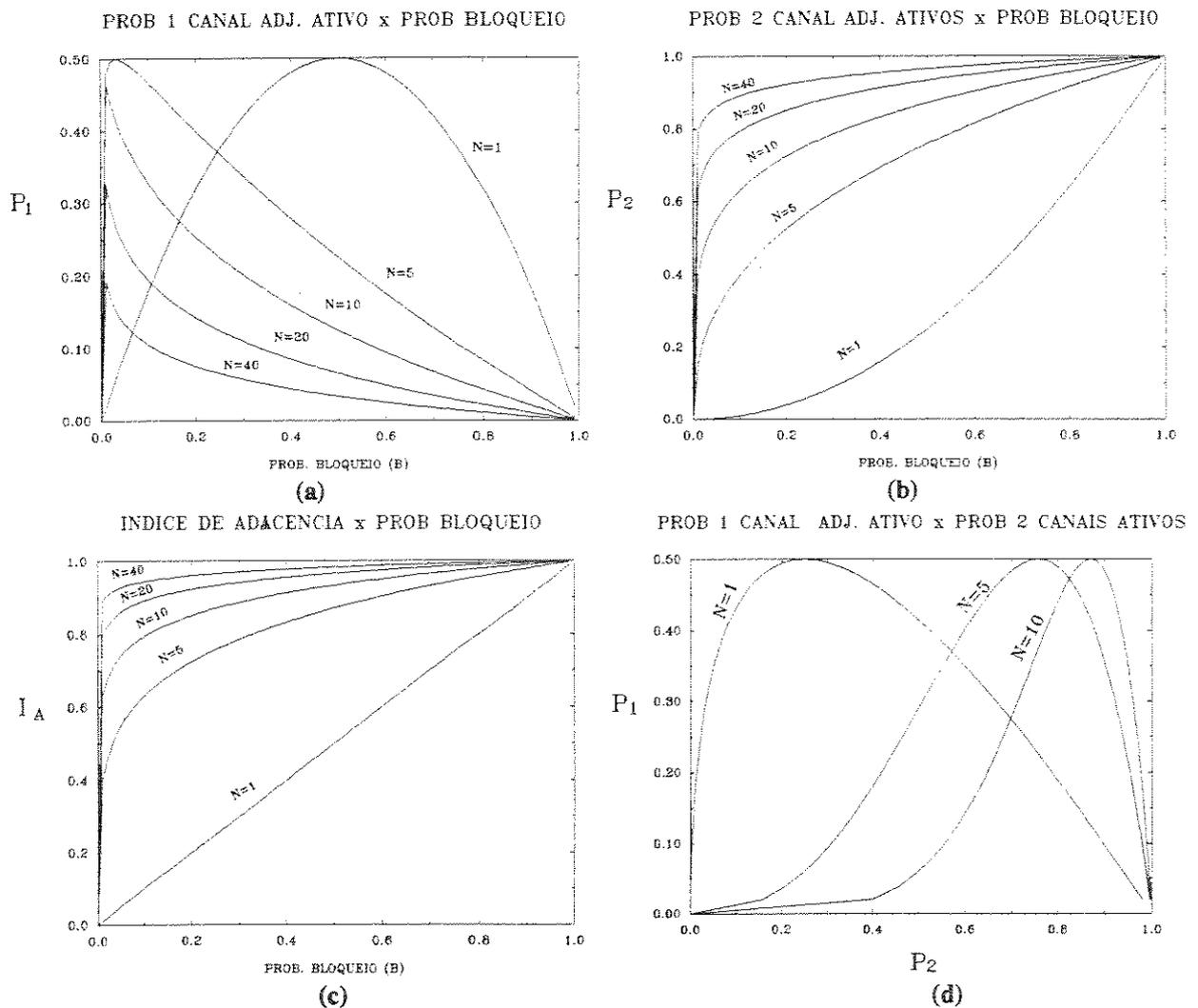


Fig. 4.7

Agora reescrevemos as expressões de probabilidade de ICA, P_M e P_B , utilizando os parâmetro de tráfego. Assim:

$$P_M = \left(\frac{\gamma + \delta}{3} \right) B^{1/N} \quad (4.16)$$

$$P_B = \mu_x^c \left(\frac{\gamma + \delta}{3} \right) B^{1/N} \quad (4.17)$$

4.5 - Técnicas de Encaminhamento Alternativo e a Probabilidade de ICA

Nesta seção, vamos relacionar (i) os conceitos de áreas de sobreposição entre as fronteiras de células vizinhas e área de cobertura de cada célula, discutidas no Capítulo 2, (ii) técnicas de encaminhamento alternativo, discutida no Capítulo 3, (iii) suas influências sobre a probabilidade de ocorrência de interferência de canal adjacente.

Como determinamos na seção 4.2, podemos expressar a probabilidade de ICA sobre a unidade móvel (P_M) e ERB (P_B) pelas equações (4.4) e (4.8), onde as variáveis γ e δ são funções das áreas de sobreposição entre células vizinhas, área esta baseada nas perdas de propagação do canal rádio móvel, na presença de desvanecimentos Rayleigh e Log-Normal, e em uma tolerância permitida (T dB) entre as perdas de propagação por caminhos diferentes. Dentro desta tolerância permitida entre as perdas dos caminhos, uma unidade móvel consegue experimentar comunicações com boa qualidade com duas ou três ERB's simultaneamente. Por sua vez, μ_x^c é função da área de cobertura de cada célula, dependendo do limiar de nível de recepção pré-estabelecido, e do tipo de ambiente de propagação.

As probabilidades de ocorrência de um ou dois canais adjacentes ativos, P_1 e P_2 , e conseqüentemente o índice de adjacência I_A , são funções da carga e distribuição de tráfego do sistema. Na seção 4.4, obtivemos as expressões que relacionam estas probabilidades com parâmetros de tráfego, neste caso a probabilidade de bloqueio por célula (B). E reescrevemos as probabilidades de ICA, P_M e P_B , em função do bloqueio.

A utilização de técnicas de encaminhamento alternativo para o tráfego gerado nas áreas de sobreposição, áreas estas definidas pelas proporções δ e γ , muda a distribuição das taxas de ocupação dos canais das células. As estratégias de encaminhamento de tráfego, utilizadas nos algoritmos, provocam uma concentração destes canais nas fronteiras entre células do sistema. Este fato, tendo em vista o que se discutiu nas seções anteriores, influencia fortemente a probabilidade de ocorrência de interferência de canal adjacente no sistema.

Como as técnicas de encaminhamento alternativo alteram as probabilidades de bloqueio médio e bloqueio por célula (B), podemos avaliar sua influência sobre a ICA utilizando as expressões (4.16) e (4.17), onde o parâmetro probabilidade de bloqueio por célula B será ditado pelos algoritmos de encaminhamento alternativo, como já discutimos no Capítulo 3.

Portanto, é possível relacionar os parâmetros de propagação (δ , γ e μ_x^c) e da distribuição de tráfego (B), e medir qualitativamente suas influências sobre a probabilidade de interferência de canal adjacente.

Então podemos simular a probabilidade de ICA como função dos parâmetros γ , δ , μ_x^c , A e N , onde A é o tráfego do sistema. Assim

$$Prob\ ICA \approx f(\gamma, \delta, \mu_x^c, A, N)$$

No próximo capítulo iremos simular várias situações envolvendo estes parâmetros, para observarmos a influência de cada um sobre a probabilidade de interferência de canal adjacente. Os resultados serão comentados e plotados em vários gráficos.

4.6 - Sumário e Conclusões.

A interferência de canal adjacente em sistemas rádio móveis celulares ocorre basicamente devido às limitações físicas dos equipamentos utilizados, da arquitetura celular com alocação de canais adjacentes na mesma célula ou células vizinhas, e finalmente devido às flutuações estatísticas no sinal recebido pela presença de desvanecimentos no canal.

O problema da interferência de canal adjacente se encrudelece à medida que consideramos a existência de sobreposição entre as fronteiras das células vizinhas, concomitantemente ao uso de técnicas de encaminhamento alternativo sobre o tráfego gerado nestas áreas.

Portanto, é necessário concatenarem-se estes fatos para se estudar qualitativamente suas influências sobre a ocorrência de ICA. Para isto foram determinadas relações entre os parâmetros de propagação e de distribuição de tráfego com a probabilidade de ICA.

Para ilustrar a importância deste estudo, podemos notar na Figura 4.6 que para tolerância permitida de 6 dB entre perdas dos diferentes caminhos de propagação num ambiente tipo Rayleigh com $\mu_r^c = 1.0$, a probabilidade de ICA sobre a unidade móvel P_M/I_A passa de 0%, no caso sem tolerância, para $\cong 12\%$, mostrando a influência da área de sobreposição sobre a ICA.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

No capítulo anterior foram definidas as condições básicas para ocorrência de interferência de canal adjacente (ICA) em um sistema rádio móvel celular, e estabelecidas as relações entre a probabilidade de ICA e parâmetros de propagação e distribuição de tráfego do sistema.

Como visto no Capítulo 2, os parâmetros de transmissão determinam a área de cobertura e proporção de área de sobreposição entre células vizinhas, ou flexibilidade do sistema. Por outro lado, os parâmetros de distribuição de tráfego são alterados pela aplicação de técnicas de encaminhamento alternativo sobre o tráfego oriundo destas áreas de flexibilidade, influenciando diretamente a probabilidade de bloqueio por célula e probabilidade de bloqueio médio do sistema (Capítulo 3).

Neste capítulo são realizadas simulações envolvendo estes parâmetros para se observar suas influências sobre a probabilidade de interferência de canal adjacente. Os resultados obtidos estão plotados em vários gráficos para mais fácil análise e entendimento.

5.1 - Considerações Gerais para Simulação.

Para simulação considerou-se um sistema composto de três células hexagonais adjacentes, com uma estação rádio base (ERB) no centro geométrico de cada célula transmitindo com a mesma potência em antenas omnidirecionais de mesma altura, ver Figura 5.1. Consideram-se ainda as unidades móveis distribuídas uniformemente sobre as áreas das células.

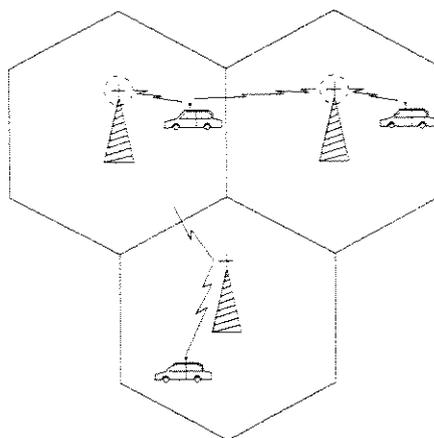
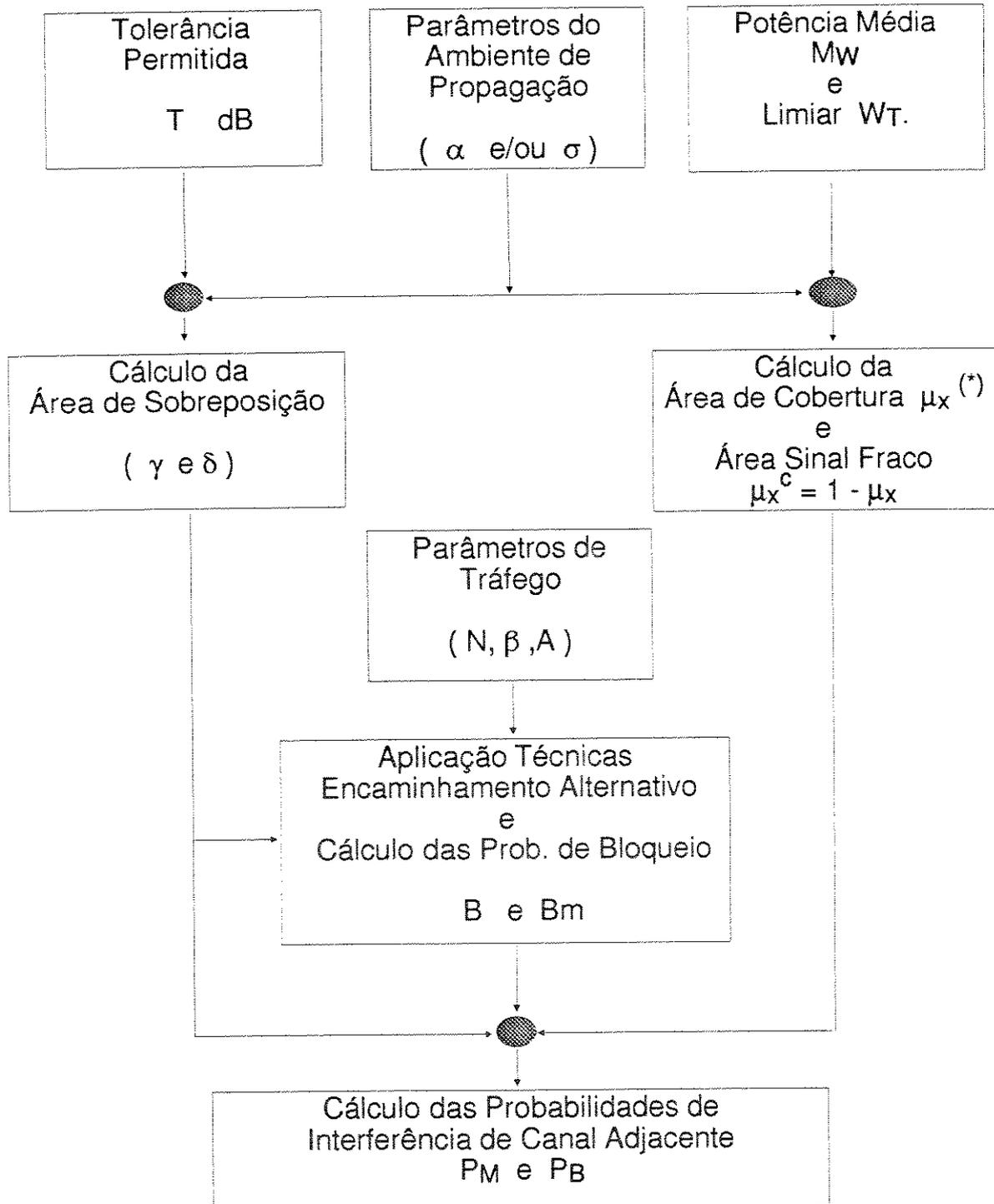


Fig. 5.1

Basicamente as simulações seguirão a ordem estabelecida no fluxograma da Figura 5.2, onde estão detalhados os parâmetros de entrada necessários para os cálculos.

(*) - onde $x = R$ para ambiente Log-Normal
e $x = r$ para ambiente Rayleigh.



Fluxograma de Simulação

Fig. 5.2

5.2 - Cálculo da Área de Cobertura da Célula.

Os resultados mostrados a seguir referem-se à seção 2.2. Utilizando-se as informações de entrada como :

- o limiar W_T e a potência média do sinal M_w ;
- o tipo de ambiente de propagação e os valores típicos dos parâmetros de perda de percurso α e/ou desvio padrão σ_w .

tem-se que, para o ambiente caracterizado pela distribuição Log-Normal, a proporção de área de cobertura μ_R , e portanto, a proporção de área de sinal fraco $\mu_R^c = 1 - \mu_R$, pode ser calculada pela expressão (2.10), reproduzida abaixo por conveniência :

$$\mu_R = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf}(a) + \exp\left(\frac{2ab+1}{b^2}\right) \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{ab+1}{b}\right) \right] \right\} \quad (5.1)$$

onde $a = (K - W_T)/\sqrt{2} \sigma_w$ e $b = 10 \alpha \log(e)/\sqrt{2} \sigma_w$.

Para o ambiente caracterizado pela distribuição de Rayleigh, a proporção de área de cobertura pode ser calculada numericamente pela expressão (2.12), reproduzida em (5.2) :

$$\mu_r = \frac{2}{\alpha} \left(\frac{k}{w_T} \right)^{2/\alpha} \gamma^c \left(\frac{2}{\alpha}, \frac{w_T}{k} \right) \quad (5.2)$$

e $\mu_r^c = 1 - \mu_r$.

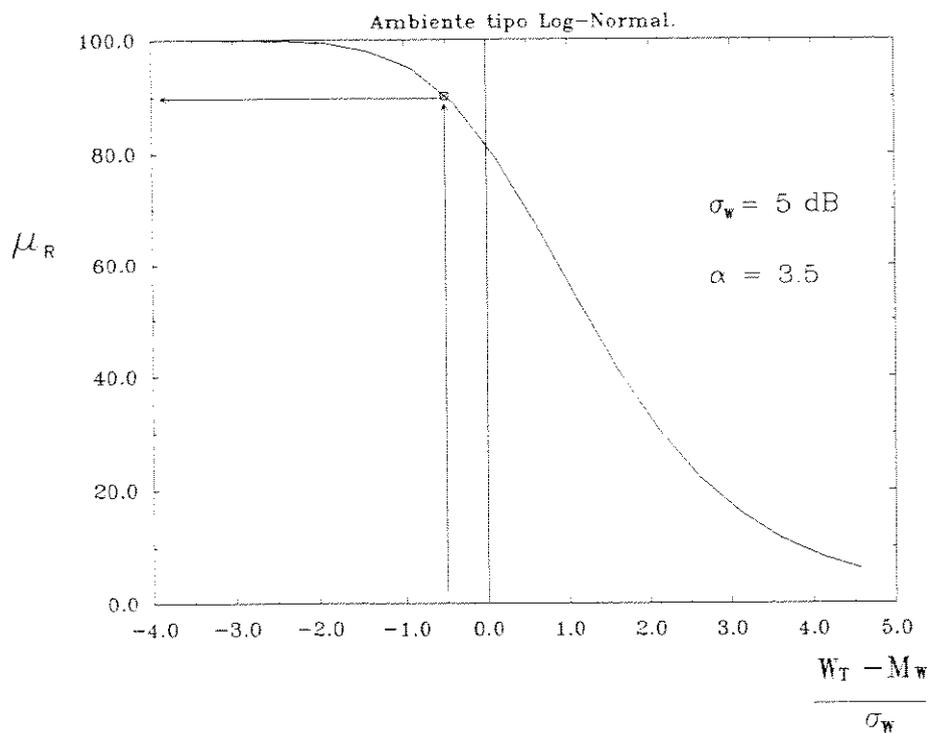
Por exemplo, para um ambiente tipo Log-Normal com $\alpha = 3.5$ e $\sigma_w = 5$ dB, deseja-se que a potência do sinal recebido esteja acima de um limiar $W_T = -105$ dB. Para potência média M_w recebida igual a -102.5 dB obtém-se uma proporção de área de cobertura $\mu_R \cong 90\%$ ou $\mu_R^c \cong 10\%$, conforme Figura 5.3.

Para um ambiente tipo Rayleigh, nas mesmas condições anteriores, obtém-se $\mu_r \cong 82\%$, ou $\mu_r^c \cong 18\%$, conforme Figura 5.4

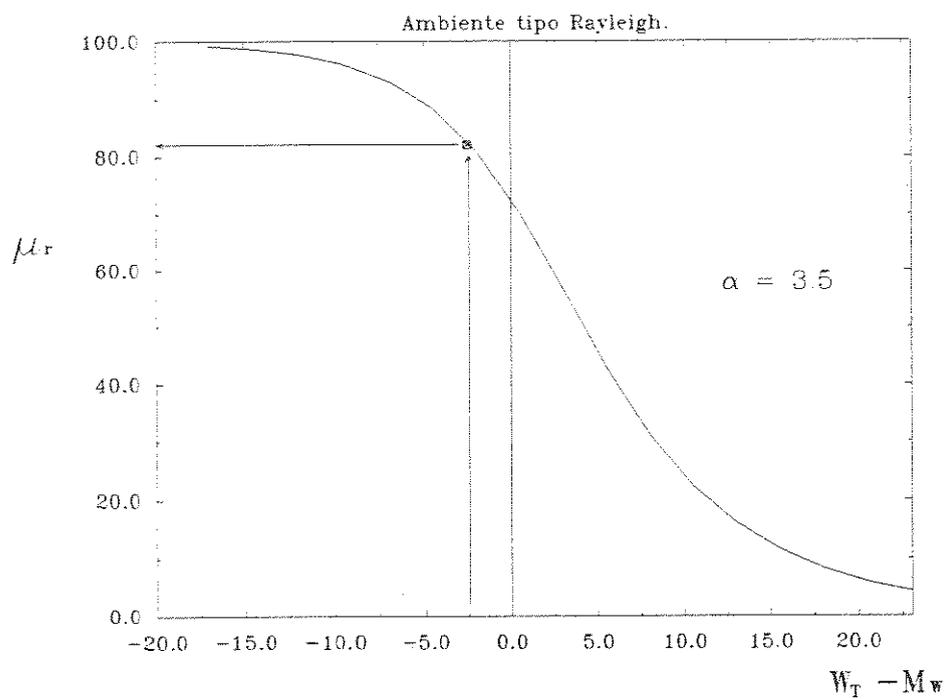
5.3 - Cálculo da Proporção de Áreas de Sobreposição.

Conforme mostrado na seção 2.3, admitindo-se uma tolerância de T dB entre as perdas nos diferentes caminhos de propagação entre a unidade móvel e as ERB's vizinhas, em um determinado ambiente de transmissão, é possível se determinar a proporção de áreas de sobreposição entre células adjacentes. Como discutido anteriormente, esta proporção indica a flexibilidade do sistema, pois o tráfego gerado nestas áreas pode ser tratado por técnicas de encaminhamento alternativo.

PROPORCAO DE AREA COM POTENCIA ACIMA DO LIMIAR



PROPORCAO DE AREA COM POTENCIA ACIMA DO LIMIAR



Para o ambiente tipo Rayleigh, a flexibilidade é calculada numericamente pela expressão (2.24), reproduzida abaixo

$$\gamma = \int_0^1 2(1-x) \left[\frac{t^2 - 1/t^2}{\alpha} - \alpha \right] \frac{dx}{(t^2 + 1/t^2) + \left(\frac{1+x}{1-x}\right) + \left(\frac{1-x}{1+x}\right)} \quad (5.3)$$

Para o ambiente tipo Log-Normal a flexibilidade é dada por (2.28) e reproduzida abaixo

$$\gamma = \int_0^1 (1-x) \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{B+T}{\sigma_w} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{B-T}{\sigma_w} \right) \right] dx \quad (5.4)$$

Exemplificando, para uma dada tolerância $T = 7\text{dB}$ em um ambiente tipo Rayleigh, com coeficiente de perda de percurso $\alpha = 3.5$, obtém-se uma flexibilidade de $\gamma \cong 34\%$ para dois caminhos, ou $\delta \cong 14\%$ para três caminhos ($\gamma \cong 1.25 \delta^2$). (Ver Figura 5.5)

Para uma mesma tolerância permitida de 7 dB em um ambiente Log-Normal, com $\alpha = 3.5$ e $\sigma_w = 5\text{dB}$, tem-se uma flexibilidade $\gamma \cong 38\%$ para dois caminhos, e $\delta \cong 18\%$ para três caminhos. (Ver Figura 5.6)

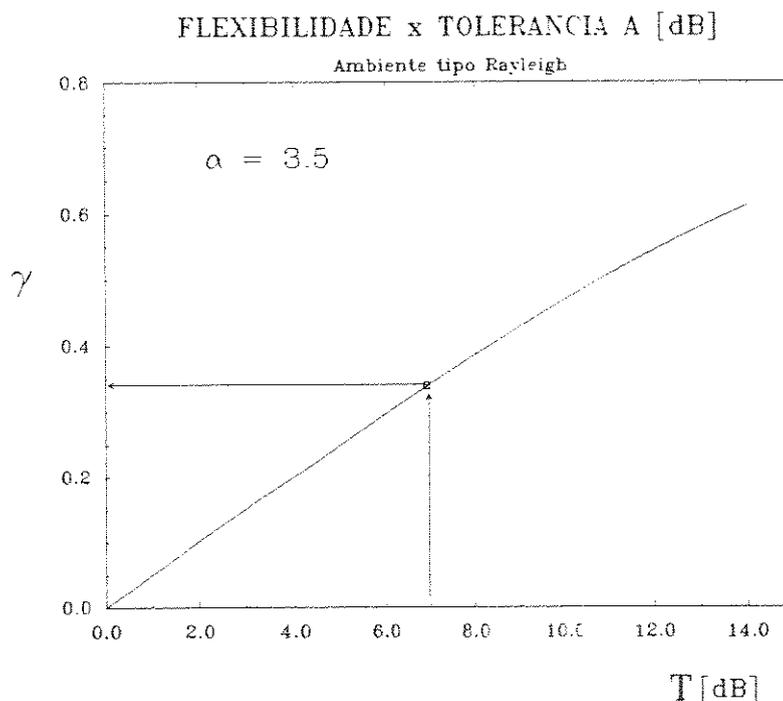
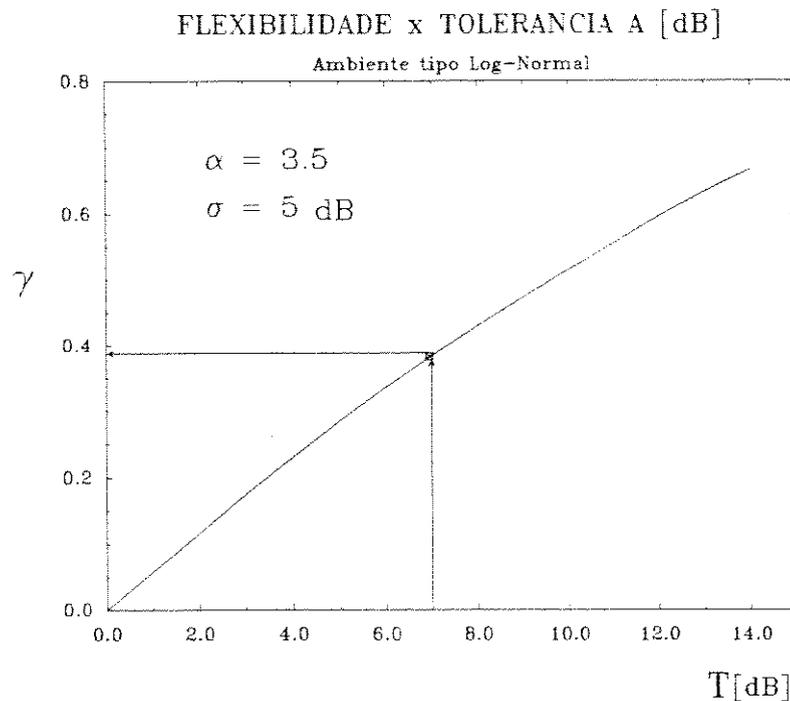


Fig. 5.5



5.4 - Aplicação de Técnicas de Encaminhamento Alternativo.

A utilização de técnicas de encaminhamento alternativo para as chamadas oriundas das zonas de sobreposição tende a reduzir substancialmente a probabilidade de bloqueio médio do sistema. Para os resultados em questão utiliza-se o algoritmo de encaminhamento alternativo IAP (Instantaneous Adaptation) para análise de desempenho do sistema. Como já discutido no Capítulo 3, o algoritmo considera um sistema composto por três células adjacentes, possuindo opção para o desvio do tráfego flexível entre duas ou três células adjacentes, respectivamente opções 0 e 1. Dadas as informações de entrada como :

- número de canais por célula (N)
- tráfego total do sistema de três células (A erl.)
- desbalanceamento de tráfego entre as células (β)
- flexibilidade (γ)
- opção de 2 ou 3 caminhos (opção 0 ou 1)

o algoritmo calcula a probabilidade de bloqueio por célula B e a probabilidade de bloqueio médio B_m . Por simplicidade considera-se o desbalanceamento nulo, como explicado no Capítulo 3.

Nas figuras 5.7 e 5.8 estão exemplos da probabilidade B de bloqueio por célula em função da tolerância permitida T dB, para os ambientes Rayleigh e Log-Normal. A relação entre a tolerância T e a probabilidade de bloqueio B se dá pela utilização da flexibilidade γ no algoritmo IAP, sendo γ função da tolerância.

Por exemplo, para uma tolerância permitida de $T = 7$ dB, um tráfego total de 12 erl. e 6 canais, tem-se da Figura 5.7 uma probabilidade de bloqueio $B \cong 10.8\%$ opção 1 e $B \cong 10.6\%$ na opção 0, para um ambiente Rayleigh. Enquanto a opção 1 na Figura 5.8, para as mesmas condições de tráfego e canais num ambiente Log-Normal com $\sigma_w = 5$ dB, fornece $B \cong 10.4\%$. Cabe lembrar que a probabilidade B de bloqueio por célula, ao contrário do bloqueio médio, pode crescer para tráfegos maiores. Isto quando houver competição pelo acesso a canais do célula entre o tráfego considerado fixo e o flexível proveniente de outras células.

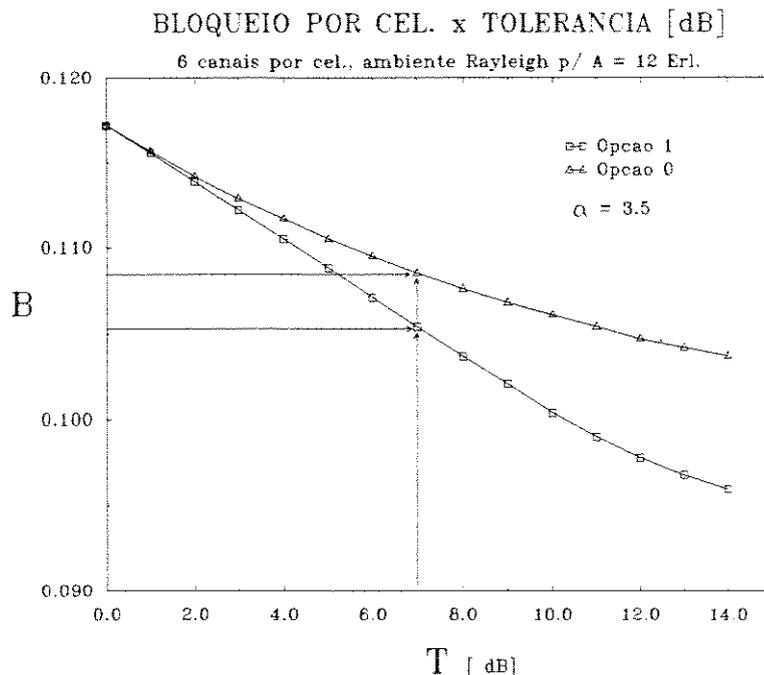


Fig. 5.7

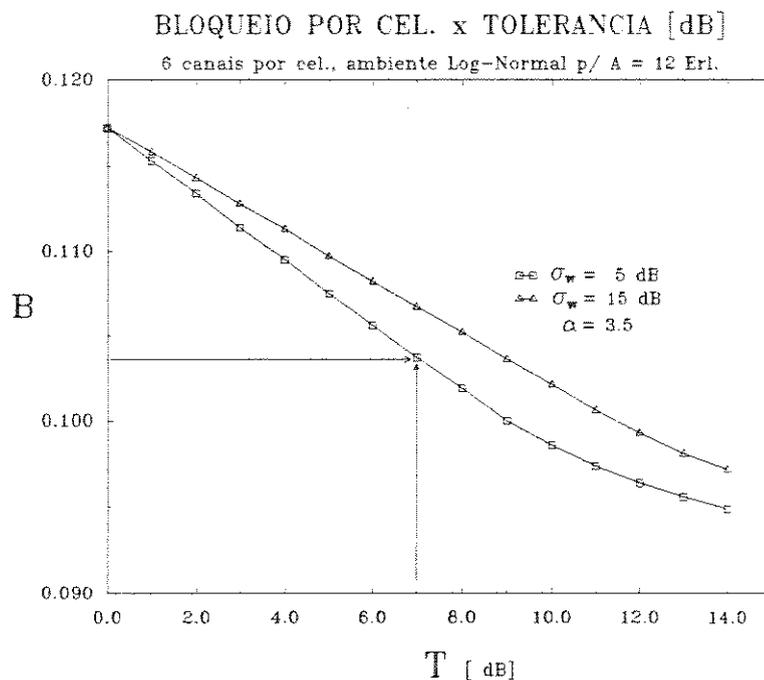


Fig. 5.8

5.5 - Probabilidade de Um ou Dois Canais Adjacentes e Índice de Adjacência.

As probabilidades de ocorrência de 1 ou 2 canais adjacentes ativos, respectivamente P_1 e P_2 , assim como o índice de adjacência I_A , são interdependentes e relacionados com o algoritmo de alocação de canais utilizado no sistema (ver Capítulo 4). Nesta simulação as probabilidades P_1 , P_2 e I_A são obtidas a partir das probabilidades de bloqueio por célula determinadas no item anterior e aplicadas nas expressões (4.14.a),(4.14.b) e (4.14.c),respectivamente, reescritas abaixo

$$P_1 = 2 B^{1/N} (1 - B^{1/N}) \quad (5.5.a)$$

$$P_2 = B^{2/N} \quad (5.5.b)$$

$$I_A = B^{1/N} \quad (5.5.c)$$

Na Figura 5.9 estão plotadas as probabilidades P_1 e P_2 em função do tráfego do sistema, para alguns graus de flexibilidade, e opção de 3 caminhos para o algoritmo IAP. Note que para um tráfego de até $A \cong 13$ erl. a probabilidade de se ter um só canal adjacente ativo é maior, ocorrendo uma inversão para valores superiores de tráfego.

Na Figura 5.10 estão plotadas P_1 e P_2 em função da flexibilidade do sistema, para alguns valores de tráfego. Realmente, P_1 e P_2 dependem unicamente do algoritmo de alocação de canais. Contudo, quando aplicam-se técnicas de encaminhamento alternativo baseadas nas áreas de flexibilidade, ocorre uma relação secundária entre os parâmetros de transmissão e as probabilidades de canais adjacentes ativos. Note que as probabilidades P_1 e P_2 são mais fortemente influenciadas pelo tráfego do que pela flexibilidade γ .

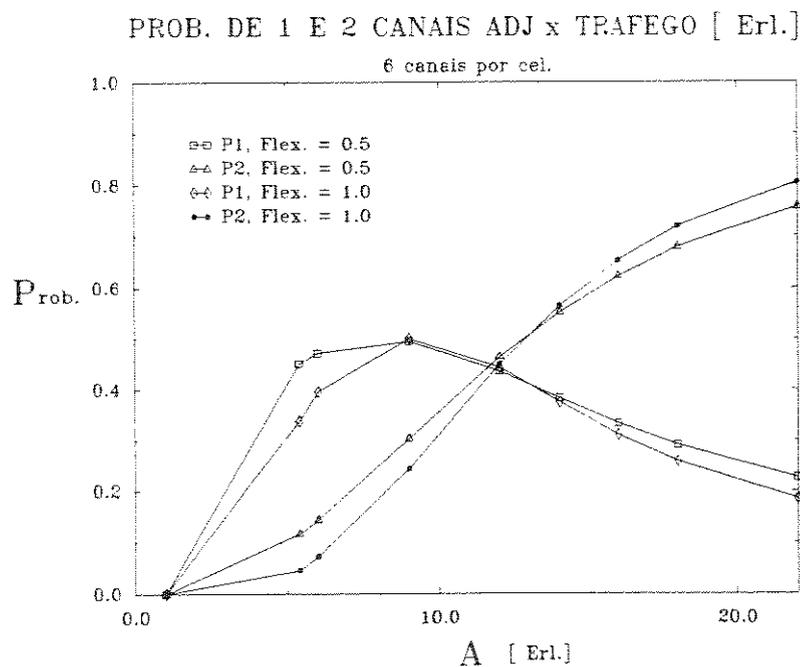


Fig. 5.9

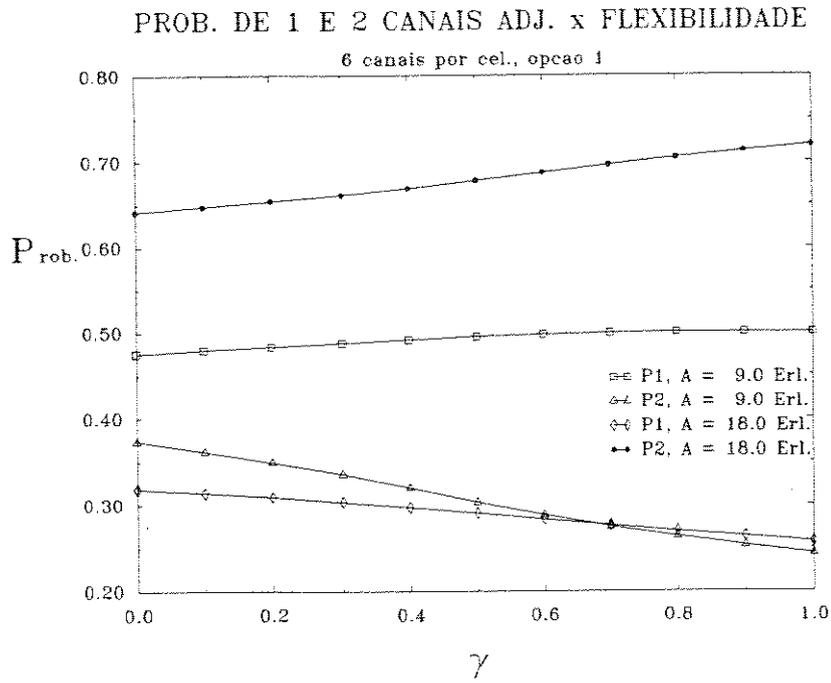


Fig. 5.10

Na Figura 5.11 tem-se a probabilidade P_1 em função da tolerância T dB, onde se observa a influência das opções de dois ou três caminhos no algoritmo IAP. Para uma variação de 14 dB na tolerância permitida ocorre uma variação menor que 2 % no valor da probabilidade P_1 na opção 1, realçando a menor influência dos parâmetros de transmissão sobre a probabilidade de canal adjacente ativo. A mesma conclusão pode ser obtida da Figura 5.12, onde se observa a influência do desvio padrão em um ambiente Log-Normal sobre a probabilidade P_1 .

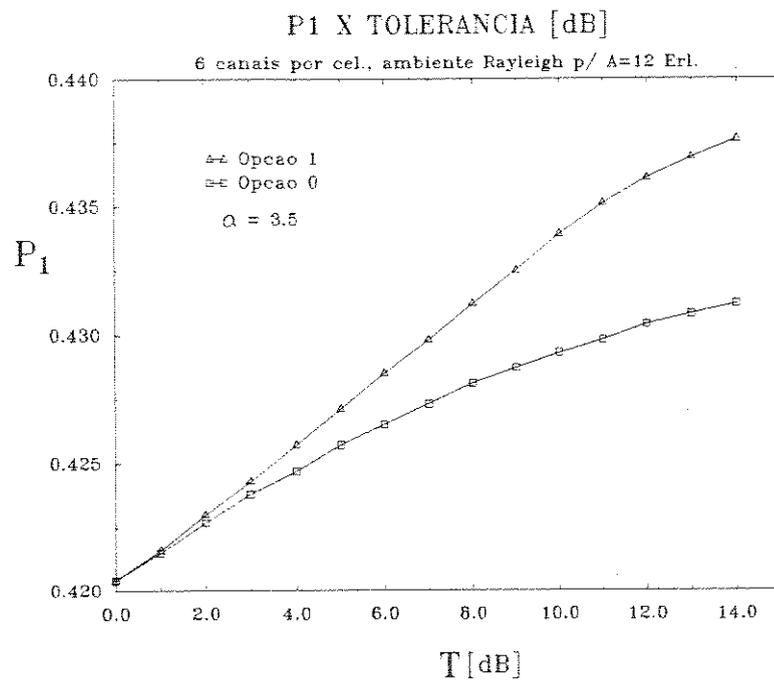


Fig. 5.11

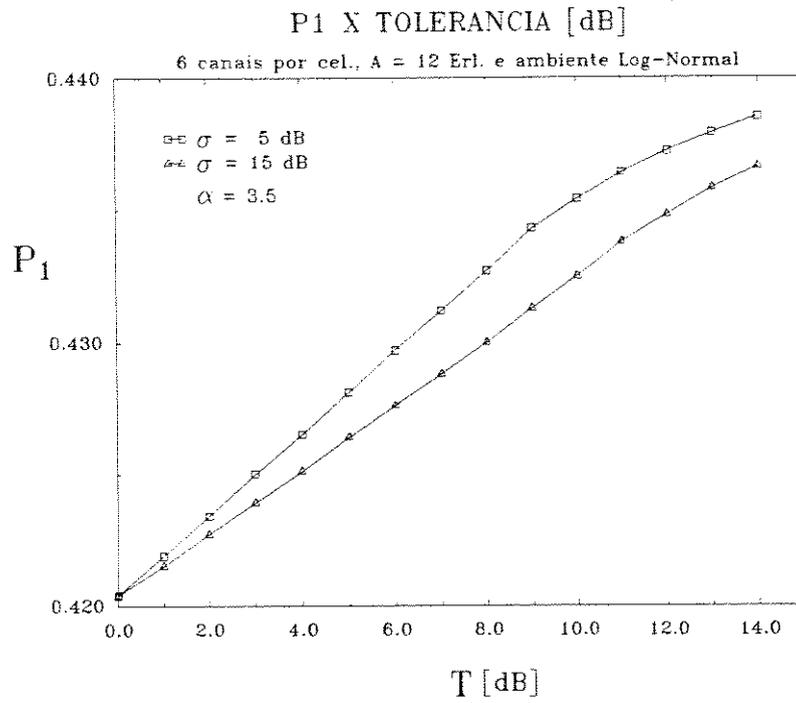


Fig. 5.12

Por outro lado, na Figura 5.13 observa-se a grande influência do tráfego sobre P₁, onde a mudança de tráfego de 12 para 18 erl. provoca uma variação de até 16 % para T = 14 dB.

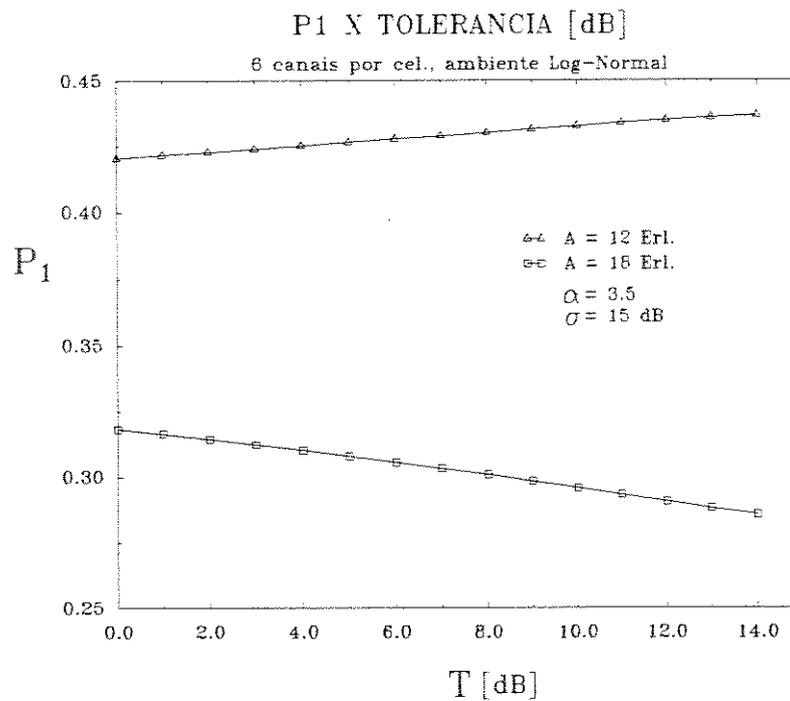


Fig. 5.13

Na Figura 5.14, tem-se a influência da opção de dois ou três caminhos sobre P_2 em função da tolerância. Novamente para uma variação de 14 dB na tolerância permitida, obtém-se uma variação de $\cong 3\%$ em P_2 , opção 1. Os mesmos comentários feitos para P_1 podem ser aplicados a P_2 , ou seja, os parâmetros de transmissão causam uma menor alteração na probabilidade de canal adjacente, ao contrário da variação do tráfego, conforme se nota nas figuras 5.15 e 5.16.

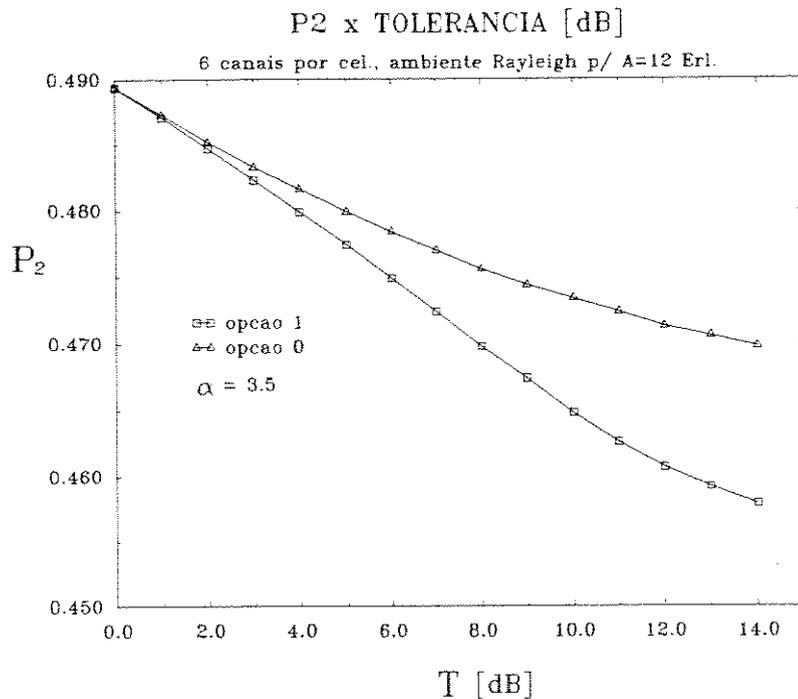


Fig. 5.14

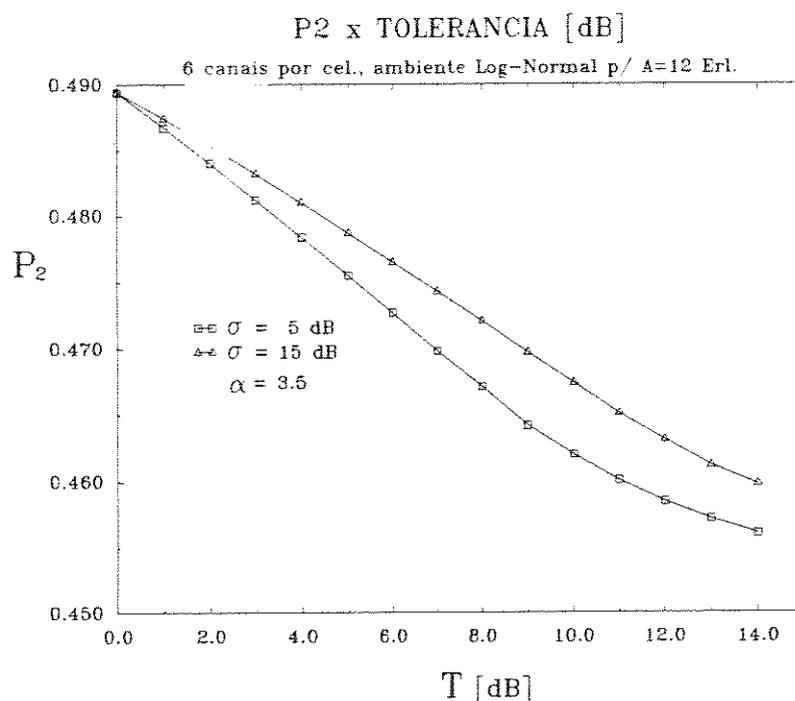


Fig. 5.15

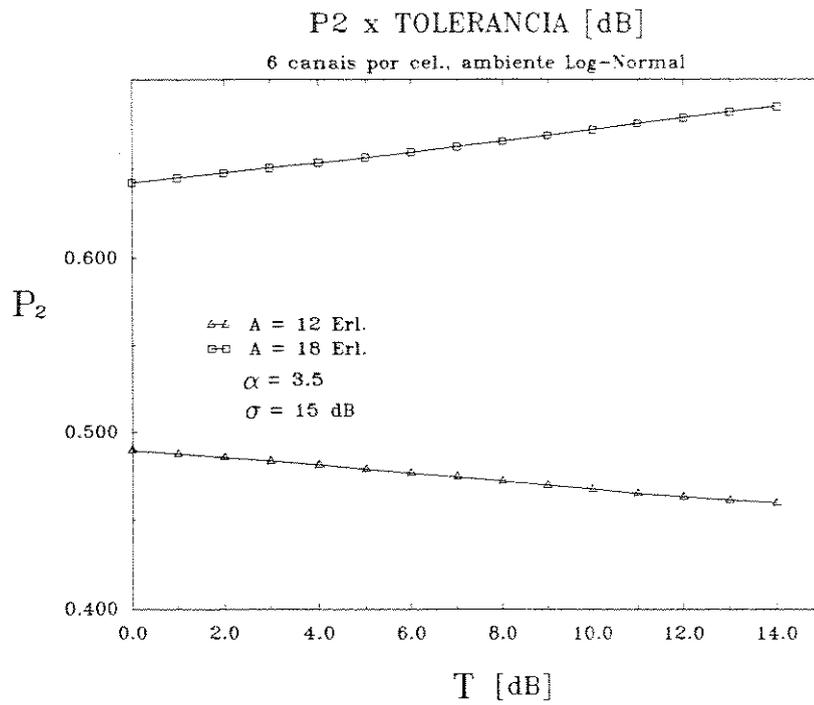


Fig. 5.16

As mesmas observações podem ser feitas a respeito do índice de adjacência I_A, estando os gráficos relativos a I_A plotados nas figuras 5.17 e 5.18.

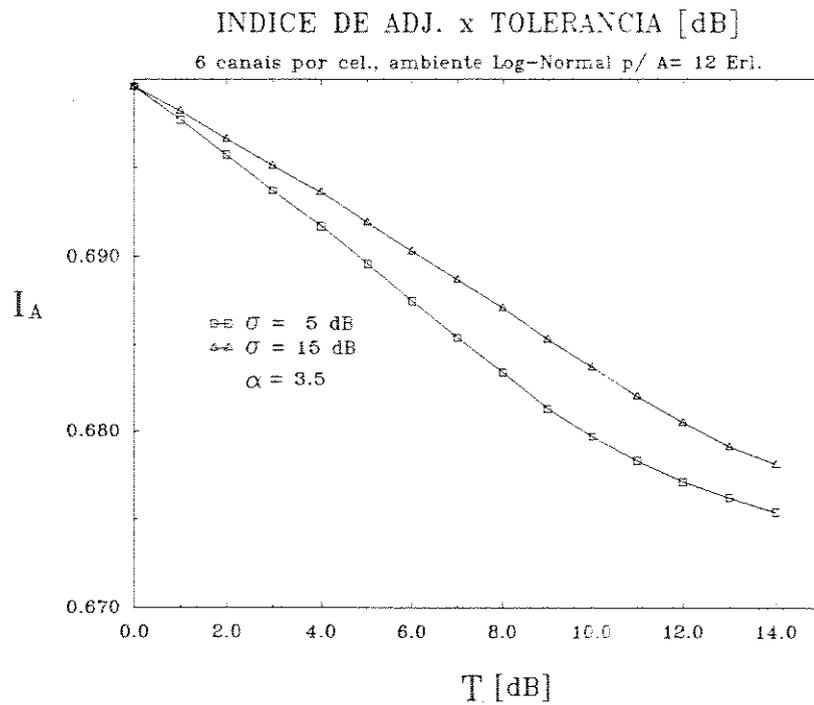


Fig. 5.17

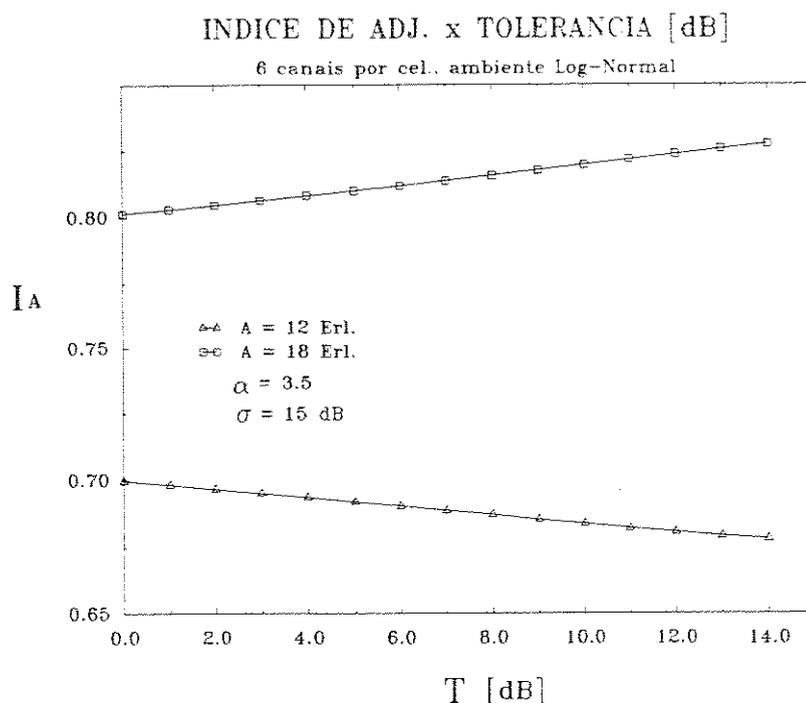


Fig. 5.18

5.6 - Cálculo da Probabilidade de ICA.

O cálculo da probabilidade de interferência de canal adjacente em um sistema rádio móvel celular, detalhado no Capítulo 4, pode ser feito sob o ponto de vista da unidade móvel e da estação rádio base, respectivamente P_M e P_B expressas em (4.16) e (4.17) e repetidas abaixo

$$P_M = \left(\frac{\gamma + \delta}{3} \right) B^{1/N} \quad (5.6)$$

$$P_B = \mu_x^c \left(\frac{\gamma + \delta}{3} \right) B^{1/N} \quad (5.7)$$

onde $x = R$ ou $x = r$, para os ambientes Log-Normal ou Rayleigh, respectivamente. Dados os parâmetros de entrada do fluxograma da Figura 5.2, tem-se que

- calculada a proporção de área de cobertura e área de sinal fraco (μ_x^c)
- calculada as proporções de áreas de sobreposição, ou flexibilidade, para dois ou três caminhos (γ e δ)
- aplicando-se o algoritmo de encaminhamento alternativo IAP e obtendo a probabilidade de bloqueio por célula (B).

Utilizam-se μ_x^c , γ , δ e B em (5.6) e (5.7) para obterem-se as probabilidades P_M e P_B em função dos parâmetros de transmissão e distribuição de tráfego simulados. A seguir estão plotados alguns resultados obtidos pela simulação.

5.6.1 - Probabilidade de ICA sobre a ERB.

Conforme a seção 4.2.2, é mais provável ocorrer a interferência de canal adjacente inter-celular sobre a ERB quando uma unidade móvel pertencente a célula estiver transmitindo de uma área de sinal fraco e, simultaneamente, uma ou duas unidades móveis estiverem transmitindo em canais adjacentes nas áreas de sobreposição com as células vizinhas (Ver Figura 4.5).

Na Figura 5.19 observa-se a probabilidade de ICA sobre a ERB em função da área de sobreposição ou flexibilidade γ , para alguns valores de μ_x^c . A curva superior neste gráfico representa a probabilidade de ICA sobre a unidade móvel (P_M), ou seja, para uma situação onde $\mu_x^c = 1$ tem-se $P_M = P_B$. Esta é uma indicação que a interferência de canal adjacente é mais crítica na unidade móvel do que na estação rádio base, pois para se ter uma igual probabilidade de ICA sobre a ERB é necessário considerar uma situação extrema de toda a célula ser área de sinal fraco.

Na Figura 5.19 os gráficos mostram os resultados obtidos num ambiente tipo Rayleigh com $\alpha = 3.5$, tráfego total de 9.0 erl. (0.5 erl por canal) e com opção de três caminhos no algoritmo IAP. Note que quanto melhor a área de cobertura da célula, menor será a influência da flexibilidade γ sobre a probabilidade P_B . Da mesma forma, P_B diminui com a melhora da área de cobertura. Por exemplo, para uma área de cobertura de 97%, ou $\mu_r^c = 3\%$, a probabilidade P_B permanece aproximadamente constante e próxima a zero.

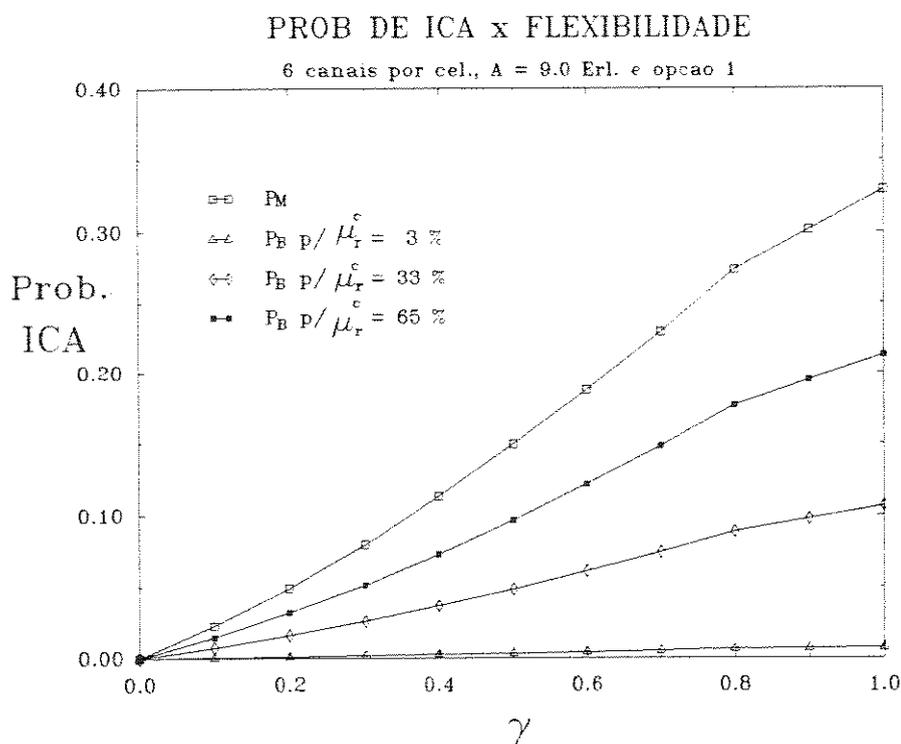


Fig. 5.19

A probabilidade P_B em função da tolerância permitida T dB entre as perdas nos diferentes caminhos para duas ou mais células, variando-se as áreas de cobertura destas células igualmente, pode ser vista na Figura 5.20, em um ambiente tipo Rayleigh. Para uma área de cobertura pequena de 35%, ou $\mu_r^c = 65\%$, a probabilidade P_B é muito maior que para uma área de cobertura razoável de 90%, ou $\mu_r^c = 10\%$. De fato, uma boa área de cobertura celular diminui a probabilidade da unidade móvel estar transmitindo de uma região de sinal fraco dentro da célula. Note que para $\mu_r^c = 10\%$, a probabilidade P_B pouco se altera com o aumento da tolerância permitida T dB.

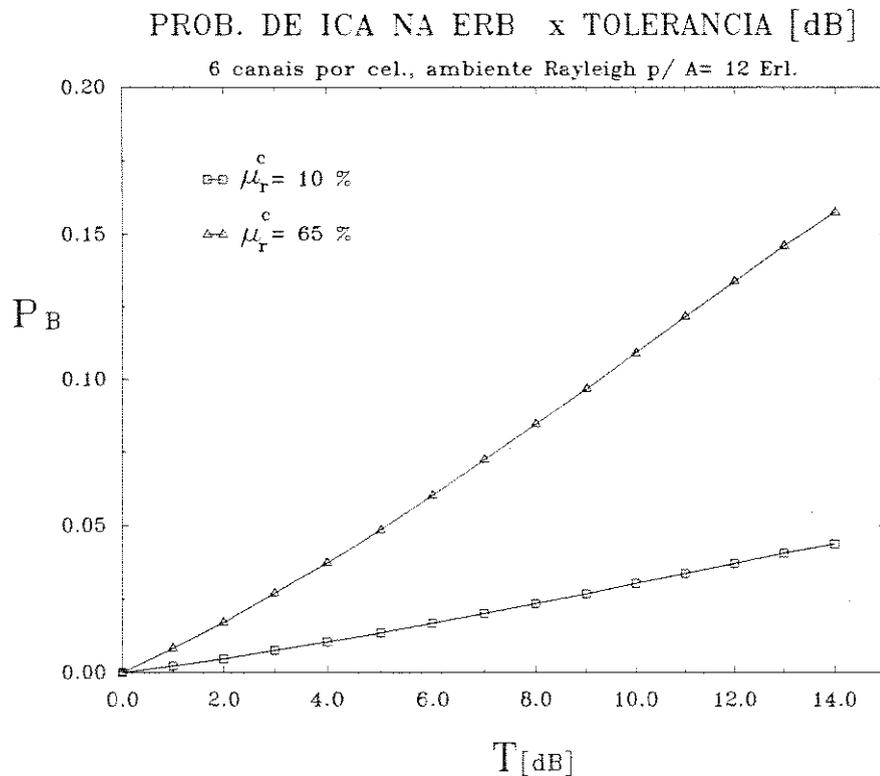


Fig. 5.20

Nas Figuras 5.21 e 5.22 tem-se a influência dos parâmetros de transmissão e tráfego sobre a probabilidade P_B , para uma área de cobertura de 67% ($\mu_r^c = 33\%$) em um ambiente tipo Rayleigh com $\alpha = 3.5$. Observa-se também a influência da variação dos valores de tráfego calculados nas duas opções do algoritmo IAP. A probabilidade P_B cresce com a flexibilidade γ , pois aumenta-se a probabilidade de haver uma unidade móvel da célula vizinha operando em canal adjacente nesta área.

O crescimento do tráfego, tanto na Figura 5.21 quanto em 5.22, também incrementa a probabilidade P_B , dada a tendência de concentração de canais nas fronteiras entre as células pelas técnicas de encaminhamento alternativo. De fato, esta alteração da distribuição de tráfego aumenta a probabilidade de unidades móveis dentro da área de sobreposição operarem em canal adjacente.

Finalmente, a opção de três caminhos é pior em termos de P_B também pelo fato do algoritmo IAP concentrar canais nas bordas. Por outro lado, a proporção de área de sobreposição para três caminhos δ , dada pelas expressões (5.6) e (5.7), é considerada nula para o cálculo de P_B e P_M na opção de dois caminhos, obtendo-se, logicamente, uma menor probabilidade de ICA.

Note ainda na Figura 5.22, que para uma área de flexibilidade nula, tem-se uma probabilidade P_B também nula, não importando os outros parâmetros de tráfego ou transmissão.

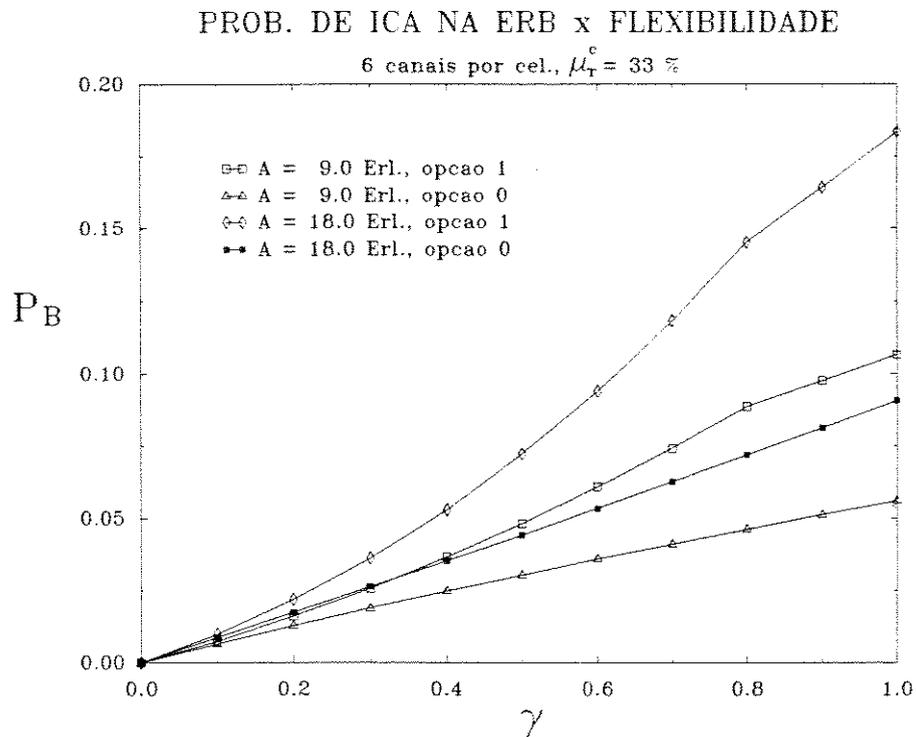


Fig. 5.21

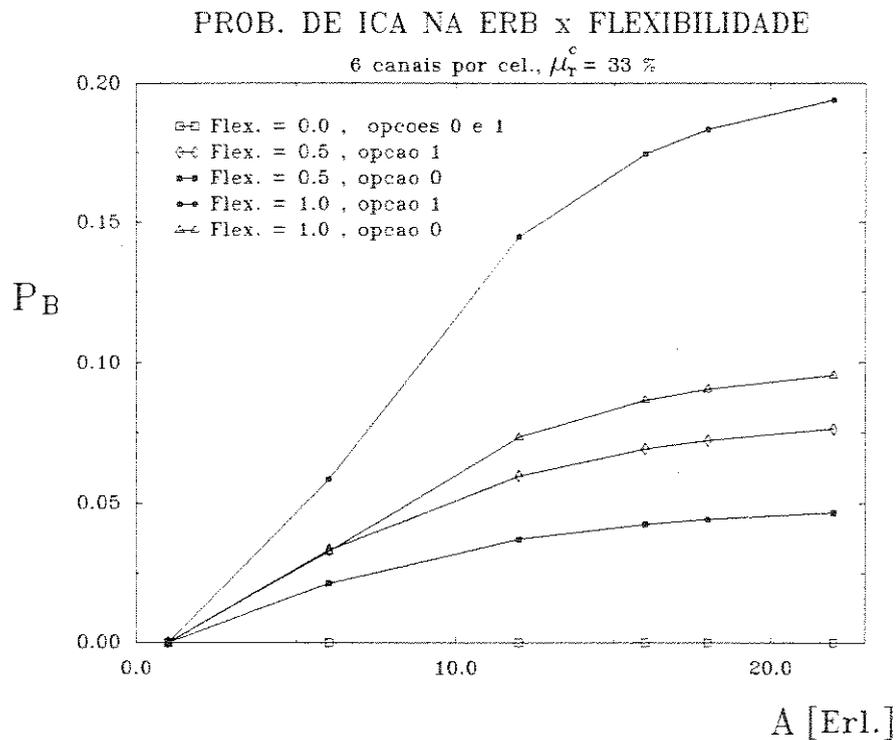


Fig. 5.22

Nas figuras 5.21 e 5.22, utilizou-se uma área de cobertura pobre de 67 % , ou $\mu_r^c = 33\%$. Para os casos mais próximos da realidade de projeto, adotam-se áreas de cobertura como as calculadas no item 5.2. Para o ambiente Log-Normal com os parâmetros $\alpha = 3.5$ e $\sigma_w = 5$ dB tem-se $\mu_R \cong 90$ % , ou $\mu_R^c \cong 10$ % . Para o ambiente Rayleigh com $\alpha = 3.5$ tem-se $\mu_r \cong 82$ % e $\mu_r^c \cong 18$ % . Logicamente, para diferentes valores de parâmetros de transmissão têm-se diferentes áreas de cobertura.

Com base em novos valores de área de cobertura, tem-se na Figura 5.23 a probabilidade de ICA sobre a ERB em função da tolerância permitida T dB, onde observa-se a influência do desvio padrão em um ambiente Log-Normal. Para uma tolerância permitida de T = 14 dB, desvio padrão $\sigma_w = 15$ dB e proporção de área de sinal fraco $\mu_R^c = 18.3$ % , o valor da probabilidade P_B não atinge 5 % .

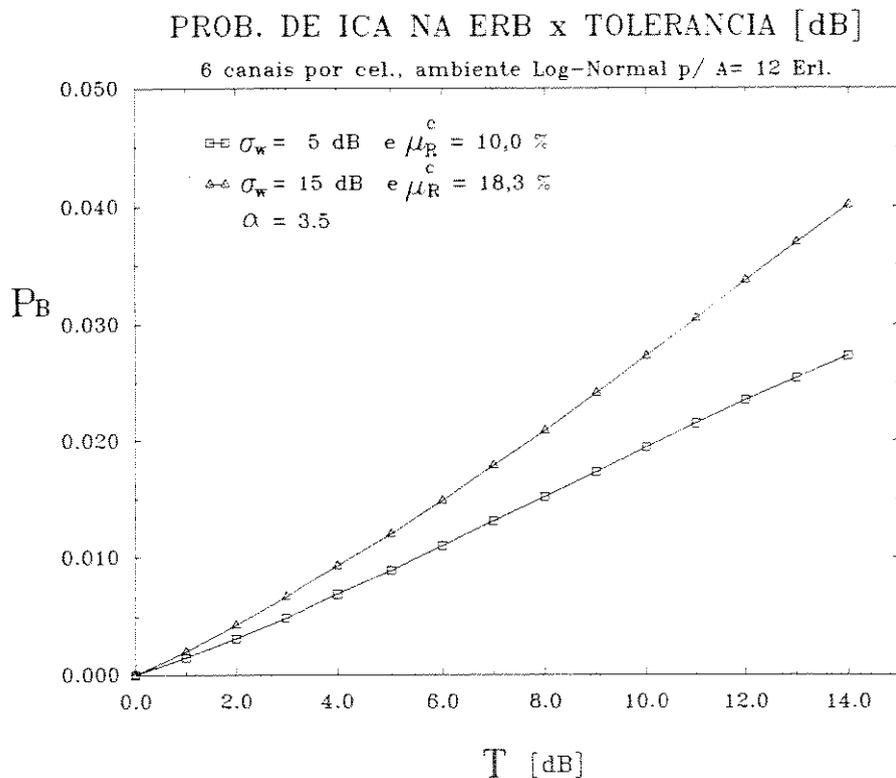


Fig. 5.23

Nas figuras 5.24 e 5.25 estão representadas as influências da variação do coeficiente de perda de percurso α nos ambientes Log-Normal e Rayleigh. Logicamente, o menor coeficiente de perda de percurso α implica em uma maior área de sobreposição, e conseqüentemente em maior probabilidade de ICA sobre a ERB.

Uma comparação da probabilidade P_B em função da tolerância permitida T nos ambientes Log-Normal e Rayleigh pode ser vista na Figura 5.26. Pelo fato da área de cobertura para o ambiente Rayleigh ser menor, a probabilidade de unidades móveis estarem transmitindo de área de sinal fraco aumenta, favorecendo a ocorrência de ICA sobre a ERB.

Na Figura 5.27, observa-se o efeito da variação de tráfego sobre P_B , em um ambiente Log-Normal para um grande desvio padrão $\sigma_w = 15$ dB. Mesmo com uma área de cobertura de 81.7 % , a probabilidade P_B para T = 14 dB e A = 18 erl. não atinge 5 % .

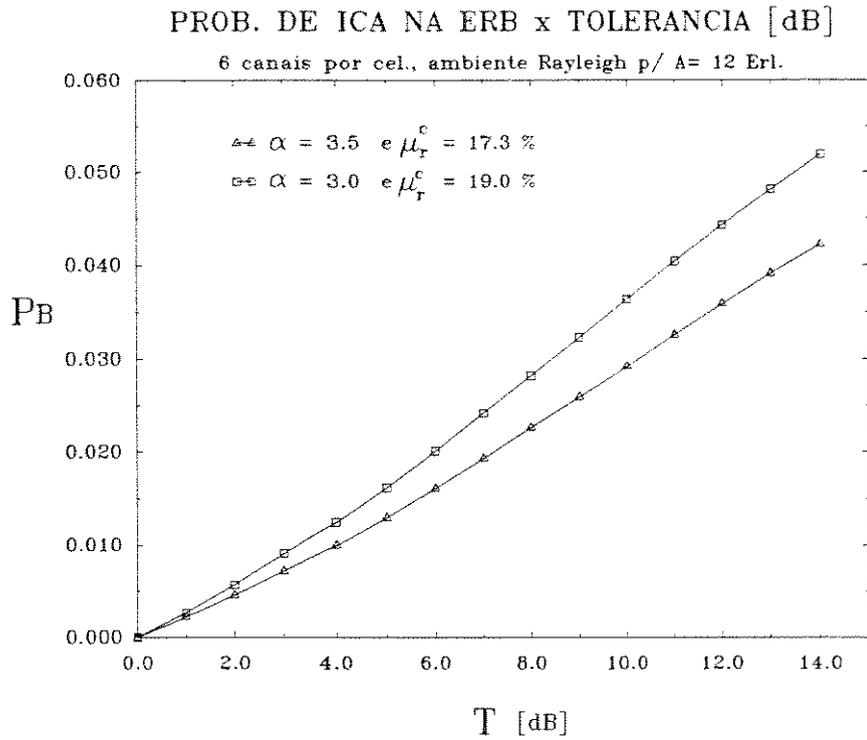


Fig. 5.24

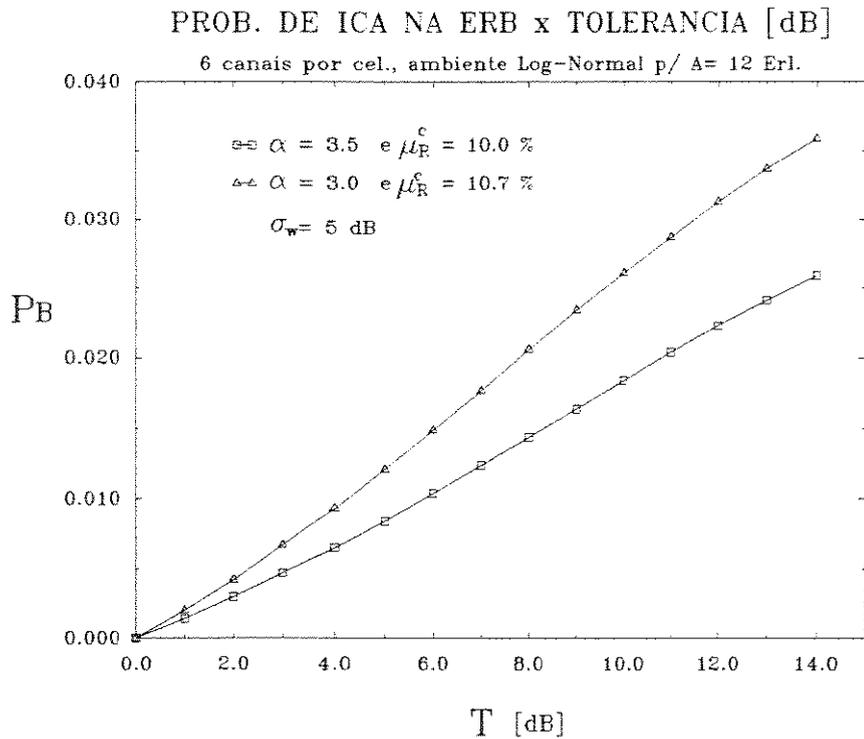


Fig. 5.25

Na Figura 5.28 observa-se o efeito da opção de dois ou três caminhos no algoritmo IAP sobre PB, como é esperado, a opção 1 para três caminhos alternativos ocasiona uma maior probabilidade de ICA sobre a ERB para valores crescentes da tolerância.

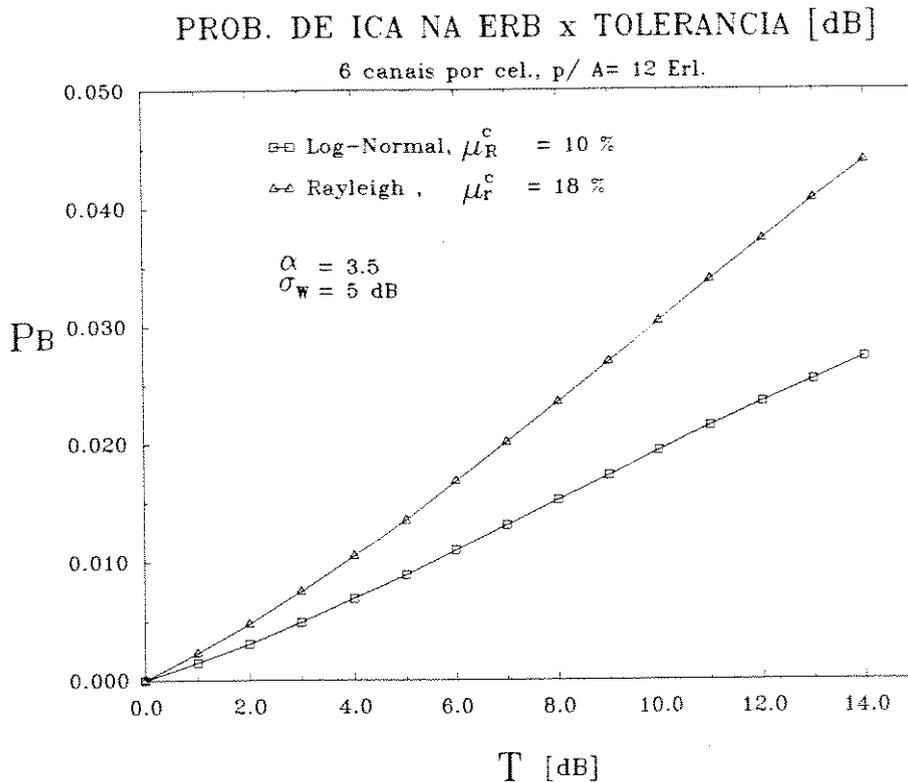


Fig. 5.26

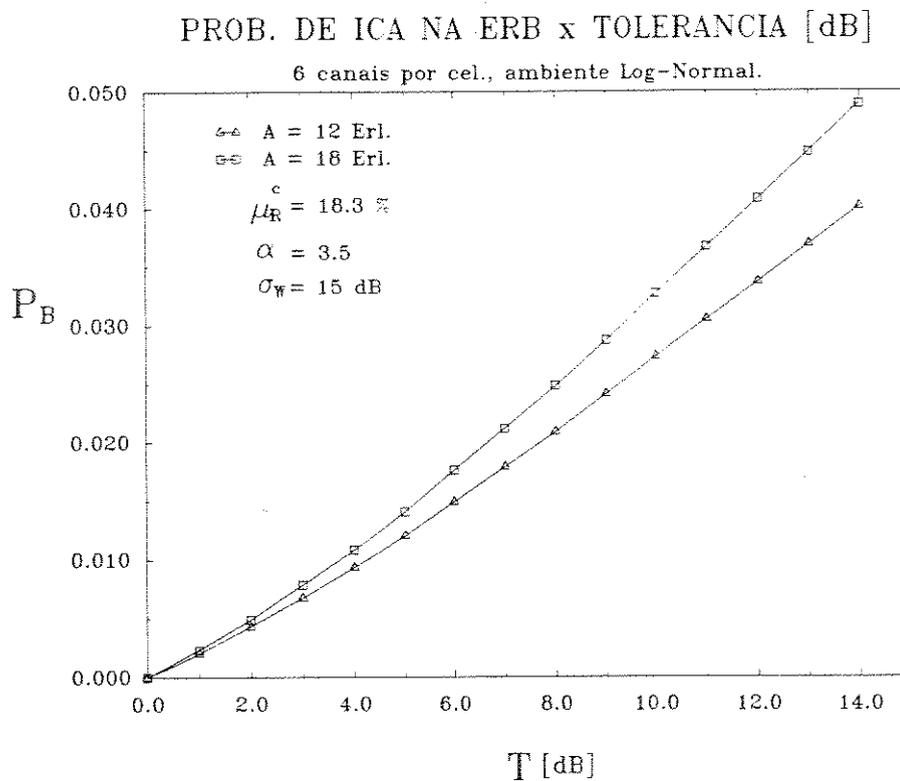


Fig. 5.27

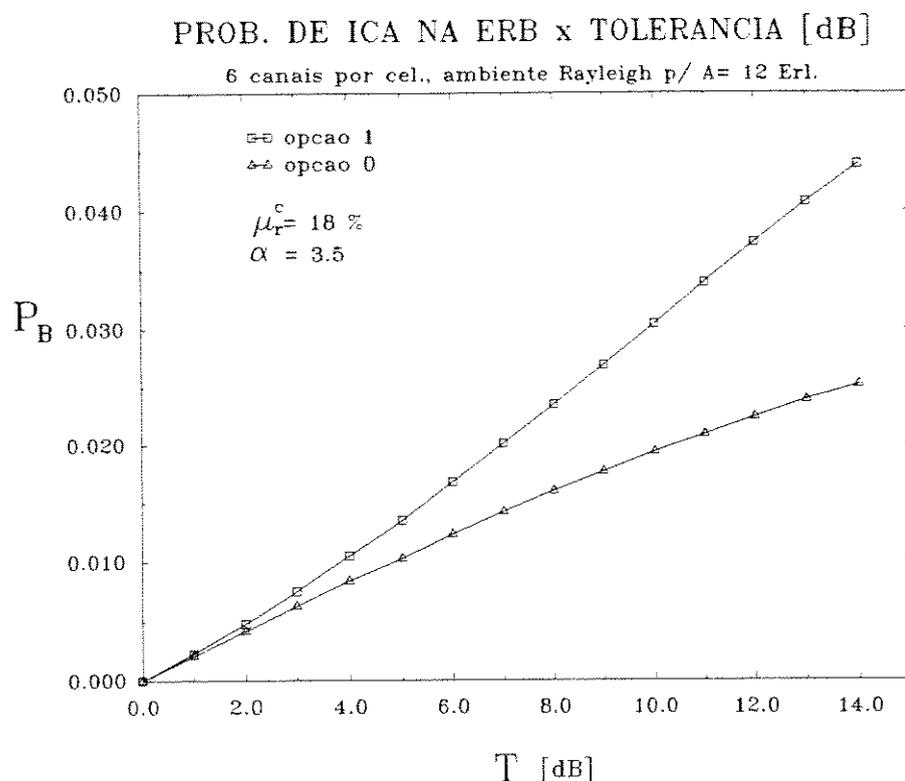


Fig. 5.28

Portanto, com base nos resultados anteriores, conclui-se ser a proporção de área de cobertura μ_x , e conseqüentemente a proporção de área de sinal fraco μ_x^c , o parâmetro de maior influência sobre a probabilidade de interferência de canal adjacente sobre a estação rádio base.

Pode-se observar pela expressão (5.7) que a probabilidade P_B é escalonada pela proporção de sinal fraco μ_x^c , a qual é menor que a unidade. Assim, quanto melhor a cobertura da célula menor será μ_x^c , e conseqüentemente menor a probabilidade de ICA sobre a ERB.

5.6.2 - Probabilidade de ICA sobre a Unidade Móvel.

Conforme a seção 4.2.1, a interferência de canal adjacente inter-celular é mais provável de ocorrer quando a unidade móvel estiver operando próxima às bordas da célula dentro da área de sobreposição, e assim estar experimentando boa comunicação com mais de uma ERB. Se estas ERB's vizinhas estiverem operando em canais adjacentes, certamente provocarão uma forte interferência sobre a unidade móvel.

Nas figuras 5.29 e 5.30 observa-se a probabilidade P_M de ICA no móvel em função da flexibilidade γ e do tráfego A , para as opções de dois ou três caminhos no algoritmo IAP. Do mesmo modo que para o caso de ICA sobre a ERB, o incremento da área de sobreposição γ , do tráfego e a opção de três caminhos aumentam a probabilidade de ICA sobre a unidade móvel.

Diferentemente do caso de ICA sobre a ERB, a interferência sobre a unidade móvel não depende da área de cobertura da célula, portanto não existe o escalonamento por μ_x^c , conforme as equações (5.6) e (5.7). Desta forma a probabilidade de ICA sobre a unidade móvel se torna mais crítica.

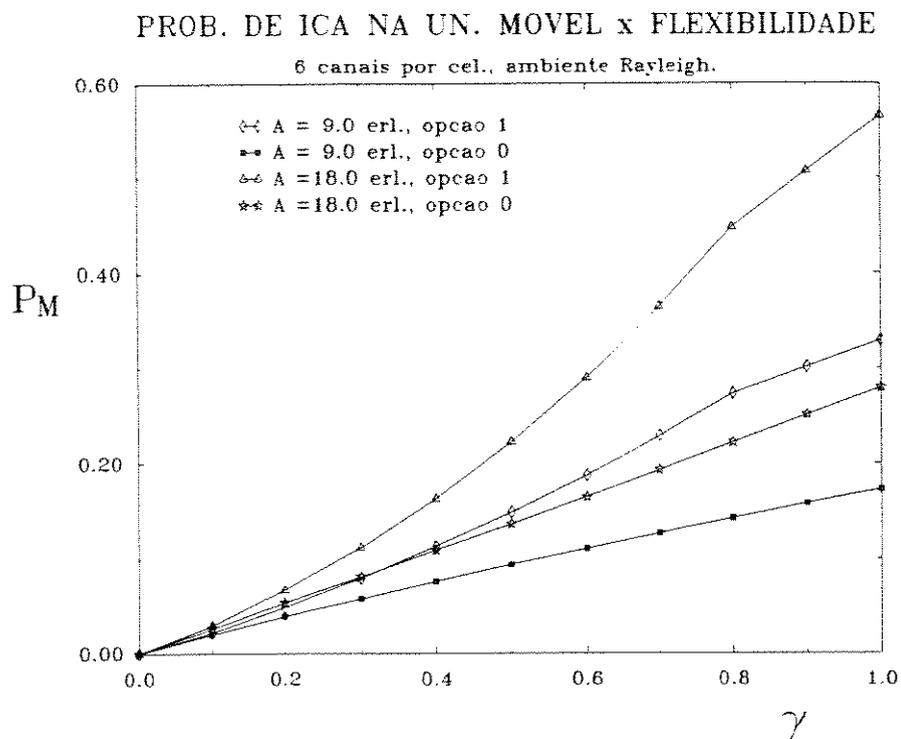


Fig. 5.29

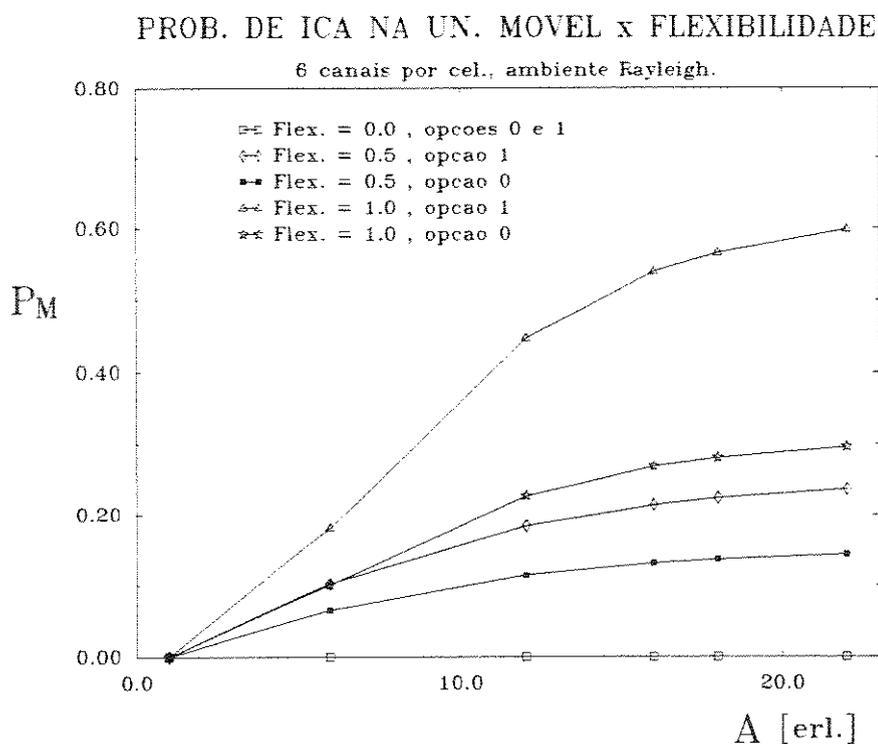


Fig. 5.30

Por exemplo, para um tráfego total $A = 12$ erl., $\gamma = 0.5$ e opção 1, tem-se da Figura 5.30 o valor de $P_M \cong 19\%$. Para as mesmas condições e com uma área de cobertura de 67%, tem-se da Figura 5.22 o valor de $P_B \cong 6.5\%$.

Observa-se na Figura 5.31 a influência da variação do tráfego sobre a probabilidade P_M , em um ambiente Log-Normal. Note que para uma tolerância permitida $T = 14$ dB e $A = 18$ erl. tem-se $P_M \cong 27\%$. Comparando com o caso da ERB, para o mesmo ambiente com uma área de cobertura de 90%, tem-se $P_B \cong 2,7\%$. Ou seja, a probabilidade P_B é dez vezes menor que P_M devido ao escalonamento promovido por μ_x^c .

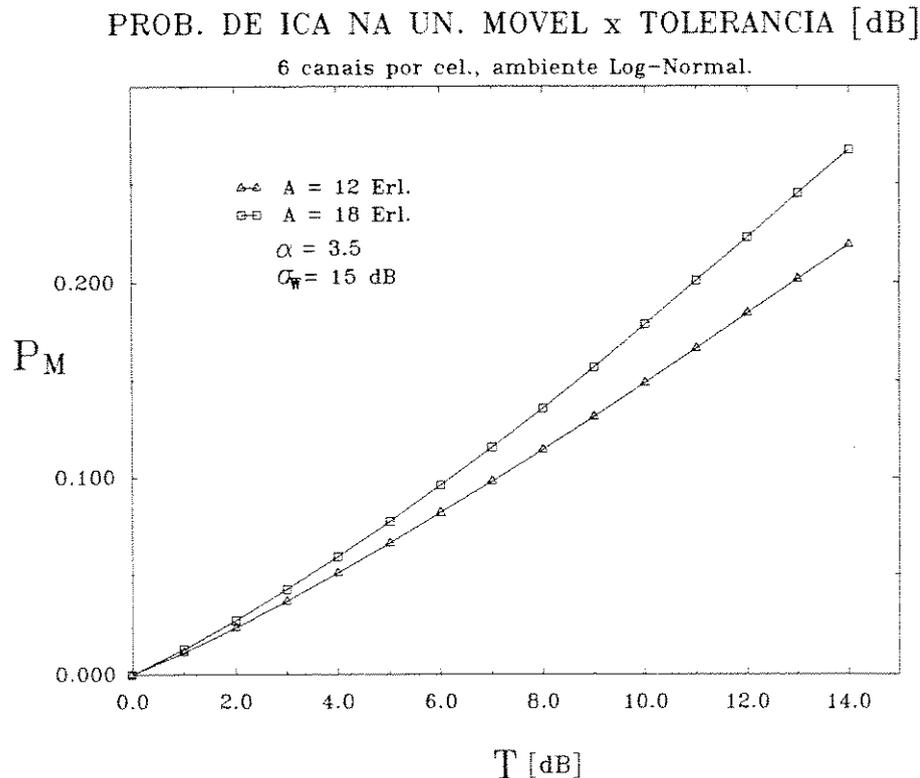


Fig. 5.31

Analogamente ao item anterior, tem-se nas figuras 5.32, 5.33 e 5.34 as influências dos parâmetros de transmissão α e σ_w sobre a probabilidade de ICA na unidade móvel em função da tolerância permitida T para a opção de três caminhos no algoritmo IAP, em ambientes Log-Normal e Rayleigh.

O comportamento dos resultados é semelhante aos obtidos para probabilidade de ICA sobre a ERB. De fato, quanto maior a tolerância permitida maior será a probabilidade P_M . Por outro lado, quanto mais dispersivo o meio de transmissão, o que se traduz em maiores coeficientes de perda de percurso α e/ou desvio padrão σ_w , menor será a probabilidade de ICA.

A maior atenuação do meio torna a área de sobreposição ou flexibilidade menor, e conseqüentemente, menor será a probabilidade de uma unidade móvel sofrer interferência de canal adjacente de uma célula vizinha. Por outro lado, uma área de flexibilidade menor implica em uma menor alteração da distribuição do tráfego pela aplicação dos métodos de encaminhamento alternativo; logo sua influência sobre o agravamento da ICA no móvel também diminui.

PROB. DE ICA NA UN. MOVEL x TOLERANCIA [dB]

6 canais por cel., ambiente Rayleigh p/ A= 12 Erl.

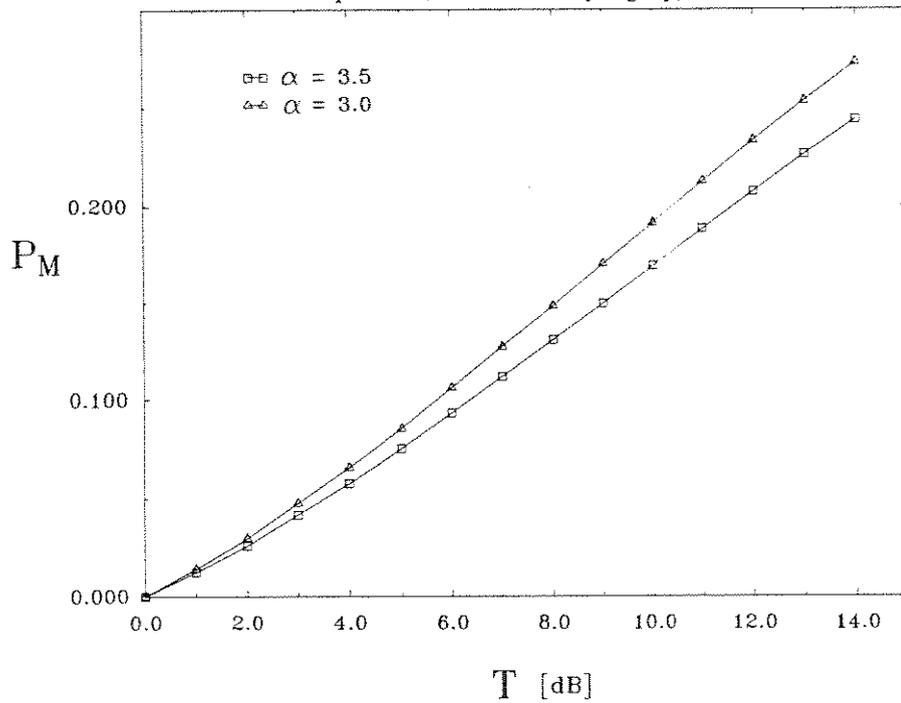


Fig. 5.32

PROB. DE ICA NA UN. MOVEL x TOLERANCIA [dB]

6 canais por cel., ambiente Log-Normal p/ A= 12 Erl.

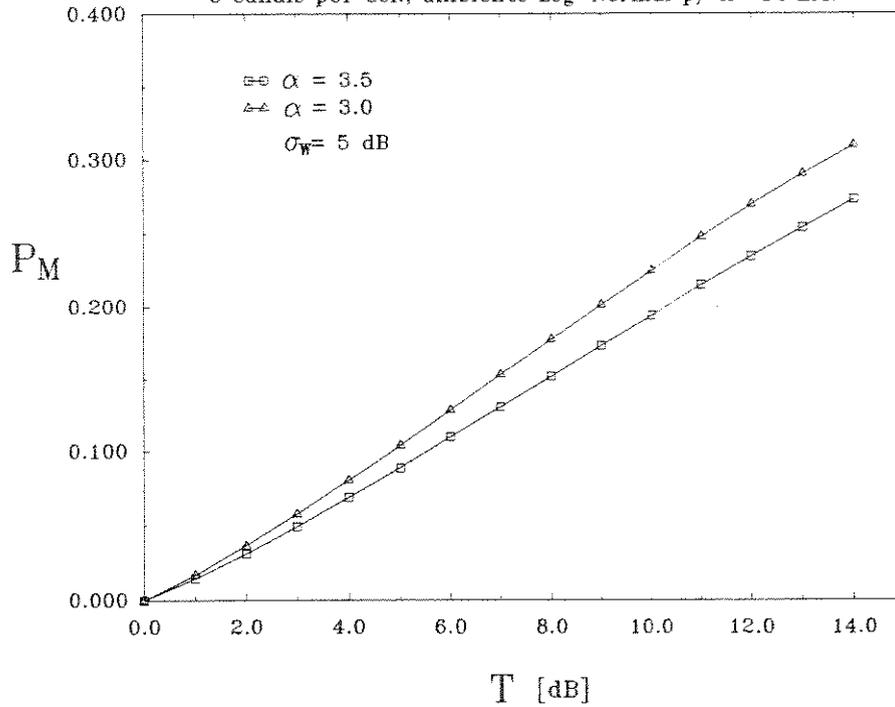


Fig. 5.33

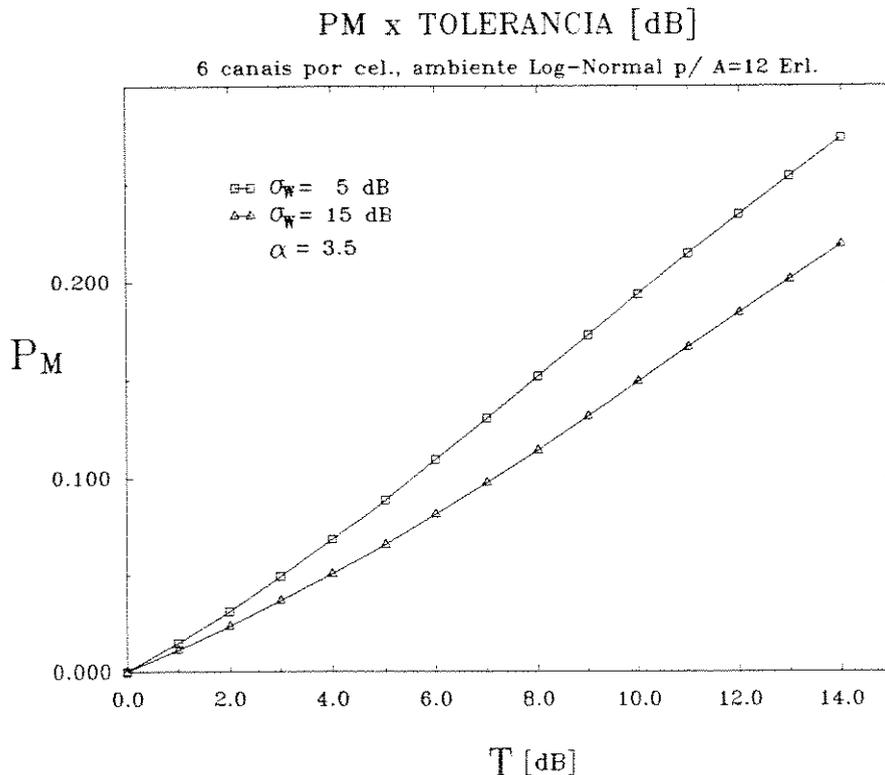


Fig. 5.34

Uma comparação entre os ambientes Log-Normal e Rayleigh pode ser vista na Figura 5.35. Observa-se que, ao contrário do caso de ICA sobre a ERB (Figura 5.26) no caso da unidade móvel o ambiente Log-Normal provoca uma maior probabilidade de ICA.

Como a probabilidade P_M é independente da área de cobertura da célula, o fator preponderante passa a ser a área de sobreposição. Neste caso, para $\alpha = 3.5$ e $\sigma_w = 5$ dB a área de sobreposição no ambiente Log-Normal é superior ao ambiente Rayleigh; logo a probabilidade P_M será maior no ambiente Log-Normal.

Na Figura 5.36 tem-se a influência das opções de dois e três caminhos no algoritmo IAP sobre P_M , em função da tolerância permitida T . Novamente o resultado obtido para opção 1 fornece uma maior probabilidade de ICA.

Finalmente, pode-se notar das figuras que a probabilidade de interferência de canal adjacente sobre a unidade móvel pode atingir valores superiores a 30 %, dependendo dos parâmetros de transmissão, distribuição de tráfego e ambiente de transmissão. E dentre estes, sem dúvida a maior contribuição ao acirramento da ICA sobre a unidade móvel provém do aumento da tolerância permitida entre as perdas nos diferentes caminhos de propagação, traduzidas pela flexibilidades γ e δ .

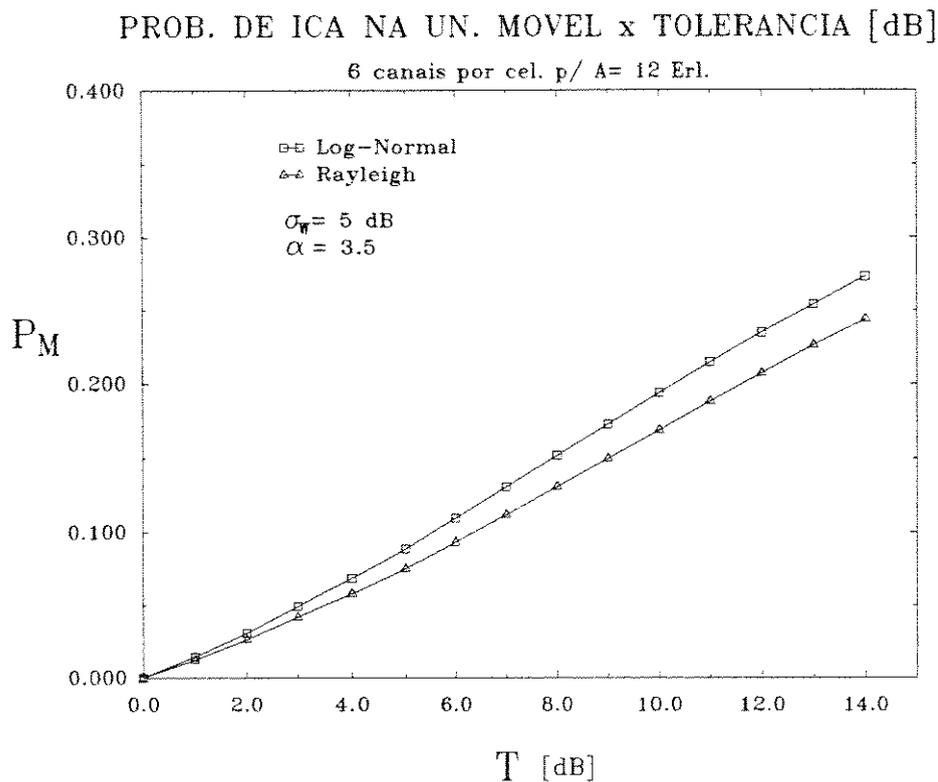


Fig. 5.35

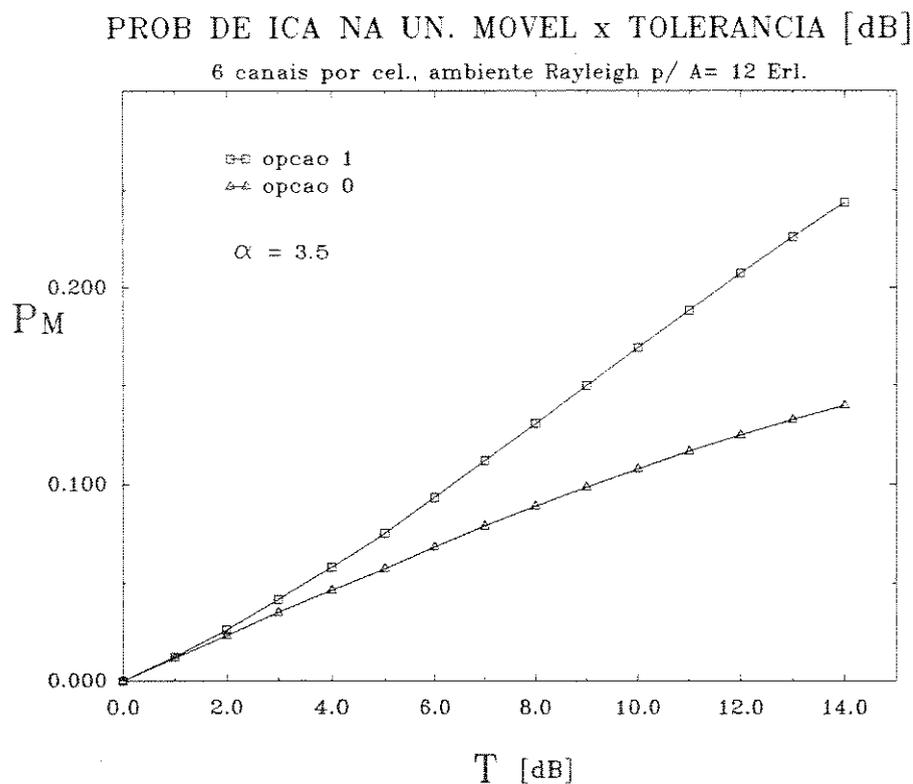


Fig. 5.36

5.7 - Sumário e Conclusões

Os resultados obtidos no Capítulo 4 são apresentados na forma de gráficos e mostram as influências dos parâmetros de transmissão e distribuição de tráfego sobre as probabilidades de interferência de canal adjacente sobre a estação rádio base e sobre a unidade móvel, respectivamente P_B e P_M .

Conclui-se pelos gráficos que a probabilidade de ICA sobre a ERB é fortemente influenciada pela proporção de área de sinal fraco da célula, e pode ser minimizada pela adoção de uma boa área de cobertura durante o projeto do sistema.

A ocorrência de ICA sobre a unidade móvel tem como fator de maior influência a tolerância permitida entre os diferentes caminhos de propagação, ou implicitamente, as flexibilidades γ e δ . Conclui-se também que a ocorrência de ICA sobre a unidade móvel é muito mais crítica que sobre a ERB, podendo P_M ser superior a P_B dez vezes ou mais.

Na comparação entre os ambientes de propagação, conclui-se que o ambiente tipo Log-Normal fornece uma maior probabilidade de ICA sobre a unidade móvel, enquanto o ambiente tipo Rayleigh fornece uma maior probabilidade de ICA sobre a ERB, para os mesmos parâmetros de transmissão e distribuição de tráfego.

No próximo capítulo apresentam-se as conclusões gerais obtidas sobre as diversas relações e influências entre os conceitos de área de cobertura, áreas de sobreposição ou flexibilidade, aplicação de técnicas de encaminhamento alternativo e a probabilidade de ocorrência de interferência de canal adjacente em um sistema rádio móvel celular.

Capítulo 6

Conclusões

Em meados dos anos 80 e início desta década observou-se um crescimento exacerbado na procura dos serviços oferecidos pelos sistemas rádio móveis celulares. Este aumento explosivo no número de usuários levou rapidamente os sistemas à saturação, com conseqüente degradação do grau de serviço estabelecido pelas normas internacionais de telefonia. Logo, havia a necessidade de expansão e melhoria de desempenho em tráfego destes sistemas.

A maioria das técnicas de expansão de sistemas celulares implicam em mudanças como por exemplo : alterar as concepções dos equipamentos, padrões de clusters, reutilização de frequências, divisão de células, etc. Neste mesmo contexto está inserida a adoção da segunda geração de sistemas celulares, com equipamentos e métodos de acesso digitais (TDMA, CDMA, etc), enfim, todos necessitando de grandes investimentos para implementação.

Uma forma mais rápida e econômica para se melhorar o grau de serviço dos sistemas é a opção por técnicas mais inteligentes de alocação de canais, como por exemplo a técnica "Direct Retry" já testada em alguns sistemas, ou ainda técnicas de encaminhamento alternativo [6]. Estas técnicas implicam basicamente em alterações do software das centrais de comutação celular.

Vários estudos [6,9,10] mostram que a aplicação de técnicas de encaminhamento alternativo melhoram efetivamente o grau de serviço oferecido pelo sistema. Estas técnicas são baseadas na utilização do tráfego disponível nas fronteiras entre células, onde são possíveis comunicações adequadas com mais de uma estação rádio base.

Por outro lado, um efeito colateral inerente à concentração de tráfego nas bordas das células promovida por estas técnicas de encaminhamento é o aumento dos níveis de interferência do sistema, especificamente as interferências de cocanal e canal adjacente, sendo a interferência de canal adjacente o nosso objeto de estudo, de maneira qualitativa, como função dos parâmetros de propagação e distribuição de tráfego.

Primeiramente, empregando-se um modelamento estatístico das perdas de propagação presentes no canal rádio móvel, determinaram-se as áreas de cobertura e proporções de áreas de sobreposição das células. Foram considerados dois tipos básicos de ambientes, quais sejam:

- um ambiente com desvanecimentos caracterizados pela distribuição Log-Normal, dado o efeito de sombreamento dos sinais;
- um ambiente com desvanecimentos caracterizados pela distribuição de Rayleigh, dado o efeito do multipercurso dos sinais.

Para o cálculo das proporções de áreas de sobreposição, considerou-se também uma tolerância T dB entre as perdas nos diferentes caminhos de propagação entre a unidade móvel e as ERB's vizinhas, dentro da qual a unidade móvel ainda experimentasse comunicações adequadas.

Definindo-se a distribuição conjunta dos sinais dos diferentes caminhos de propagação, e aplicando-se o critério da distribuição geográfica da razão entre potências instantâneas, foi possível estimarem-se as proporções de unidades móveis com boa comunicação com duas (γ) ou três (δ) ERB's vizinhas, dadas as tolerâncias permitidas, observando-se ainda a influência dos parâmetros de propagação dos ambientes Log-Normal e Rayleigh.

Concluiu-se, dos gráficos apresentados, que as proporções de área de sobreposição podem atingir facilmente valores significativos entre 30 a 45%, dependendo da tolerância permitida e do ambiente de transmissão, portanto, sendo de grande interesse a utilização de técnicas de encaminhamento alternativo sobre o tráfego gerado nestas áreas, o chamado tráfego flexível.

Foram apresentadas algumas técnicas de encaminhamento alternativo, as quais diferem basicamente na utilização de informações do sistema. O processo de tráfego é modelado por cadeias de Markov, especialmente processos de "nascimento e morte".

A partir dos parâmetros de transmissão, γ e δ , e das densidades de transição entre os estados do sistema, construiu-se uma matriz de decisão para a estratégia de encaminhamento do tráfego reconhecido como flexível, a ser dividido entre duas ou três ERB's vizinhas.

Utilizando-se em especial a técnica IAP [6], observou-se uma diminuição na probabilidade de bloqueio médio do sistema, ou seja, uma melhoria no grau de serviço. Dependendo da carga total de tráfego e da flexibilidade (γ ou δ), a probabilidade de bloqueio médio B_m pode sofrer uma redução substancial, isto em relação aos casos que não aplicam a técnica. Como no exemplo da Figura 3.6 onde para um mesmo grau de serviço de 6%, obteve-se um aumento aproximado de 50% na capacidade de tráfego.

Outro fato notado é o aumento da probabilidade de bloqueio individual por célula para grandes áreas de sobreposição ou altas cargas de tráfego, decorrentes das disputas pelos canais entre o tráfego fixo da célula e o tráfego flexível oriundo das células vizinhas.

Finalmente, foram definidas as situações e condições básicas para a ocorrência de interferência de canal adjacente em um sistema rádio móvel celular, principalmente a interferência de canal adjacente inter-celular.

Estabeleceram-se as relações entre as probabilidades de interferência de canal adjacente e os parâmetros de propagação (γ e δ) e distribuição de tráfego (B_m), tanto para a estação rádio base quanto para a unidade móvel.

6.1 - Conclusões Principais sobre a Interferência de Canal Adjacente.

Analisando-se os resultados obtidos nas simulações, observaram-se as seguintes conclusões descritas a seguir.

6.1.1 - Probabilidades de Um ou Dois Canais Adjacentes Ativos e Índice de Adjacência.

As probabilidades de um ou dois canais adjacentes ativos, respectivamente P_1 e P_2 , e o índice de adjacência I_A inicialmente dependentes do algoritmo de alocação de canais, passam a depender também dos parâmetros de propagação quando se aplicam técnicas de encaminhamento alternativo.

6.1.2 - Probabilidade de ICA sobre a ERB.

O crescimento do tráfego do sistema e da flexibilidade γ , ou implicitamente da tolerância permitida T , implicaram em um aumento da probabilidade de ICA sobre a ERB, como esperado. E em sentido contrário, quanto maior o coeficiente de perda de percurso α e o desvio padrão δ_w menor é a probabilidade de ICA sobre a ERB, pois diminui-se a flexibilidade do sistema.

Constatou-se que a proporção de área de cobertura da célula μ_x , e conseqüentemente a proporção de área de sinal fraco μ_x^c , é o parâmetro de maior importância para a ICA sobre a ERB. De fato, pode-se observar dos resultados que para áreas de cobertura superiores a 80 % dificilmente a probabilidade P_B de ICA sobre a ERB ultrapassa o valor de 5 %, isto independentemente dos outros parâmetros e ambientes considerados.

Comparando-se os ambientes Rayleigh e Log-Normal, para $\alpha = 3.5$ e $\sigma_w = 5\text{dB}$, constatou-se que o primeiro fornece uma maior probabilidade P_B , isto pelo fato do ambiente Rayleigh ter uma menor área de cobertura μ_r .

A opção de três caminhos no algoritmo IAP forneceu uma maior probabilidade de ICA devido ao maior número de canais concentrados nas bordas das células.

Finalmente, concluímos que a probabilidade de interferência de canal adjacente sobre a estação rádio base somente passa a ser alvo de preocupação para áreas de cobertura pequenas, i.e., com μ_x 's inferiores a 75 %, o que é um péssimo valor de projeto em sistemas celulares.

6.1.3 - Probabilidade de ICA sobre a Unidade Móvel.

Dos resultados vemos que a probabilidade P_M de ICA sobre a unidade móvel segue o mesmo comportamento apresentado quanto a interferência sobre a ERB, em função da flexibilidade, ou tolerância permitida, tráfego, coeficiente de perda de percurso a e desvio padrão σ_w , e opções do algoritmo IAP.

Diferentemente do caso de ICA sobre a ERB, a interferência sobre a unidade móvel não depende da área de cobertura da célula. De fato, P_M não está sujeito ao escalonamento promovido

pelo coeficiente μ_x^c , menor que a unidade. Portanto, a probabilidade de ICA sobre a unidade móvel pode tornar-se muito crítica. Por exemplo, temos dos resultados temos que para uma área de cobertura de 90 %, P_M pode ser dez vezes maior que P_B .

Isto é fácil de se entender, no caso da ICA na ERB não basta haver uma unidade móvel transmitindo em canal adjacente da área de sobreposição uma célula vizinha, é necessário também que a unidade móvel da sua própria área de serviço esteja transmitindo simultaneamente de uma área considerada de sinal fraco. Esta ressalva não existe para o caso de ICA sobre a unidade móvel.

Outra diferença entre P_B e P_M pode ser notada da comparação entre os ambientes Rayleigh e Log-Normal. Neste caso, ao contrário da ICA sobre a ERB, o ambiente Log-Normal provoca uma maior probabilidade de ICA sobre a unidade móvel. Isto devido ao fato da área de sobreposição para este ambiente ser maior que no caso do ambiente Rayleigh, aumentando-se assim as chances de haver unidades móveis transmitindo em canal adjacente nas áreas de sobreposição entre diferentes células vizinhas.

No caso da probabilidade de ICA sobre a unidade móvel, mostrou-se ser a maior contribuição vinda dos parâmetros de propagação, especialmente a tolerância permitida T dB.

6.2 - Conclusões Finais.

Conclui-se, assim, ser a probabilidade de interferência sobre a unidade móvel o fator de maior preocupação para os projetistas de sistemas celulares, quando da aplicação de técnicas de encaminhamento alternativo, utilizando-se o conceito de bordas indefinidas entre células.

A probabilidade de interferência de canal adjacente sobre a unidade móvel pode atingir facilmente o valor de 30%, dependendo dos parâmetros de transmissão e da distribuição de tráfego, enquanto que a probabilidade de ICA sobre a ERB dificilmente ultrapassa 5 %.

Finalmente concluindo, sem dúvida são inegáveis as vantagens da utilização de técnicas de encaminhamento alternativo na melhoria do grau de serviço dos sistemas rádio móveis celulares. Mas há sempre de se levar em conta, antes da implantação destas técnicas, um estudo completo dos efeitos causados às interferências presentes no sistema, especialmente as interferências de cocanal e canal adjacente. Pois, como mostram os resultados obtidos por esta tese, na tentativa de se otimizar o sistema pode-se incorrer na degradação e até inviabilidade de operação do mesmo.

6.3 - Trabalhos Futuros.

Este trabalho explorou a situação particular de um sistema celular de pequeno porte, com tráfego balanceado e células com mesma capacidade num ambiente Rayleigh ou Log-Normal. Como proposta de trabalho futuros sugere-se estudar a interferência de canal adjacente considerando-se os seguintes casos :

- 1 - Desbalanceamento de tráfego entre células.
- 2 - Células com diferentes capacidades de tráfego.

3 - Sistema celular infinito, onde as células estão distribuídas sobre a superfície de um toróide.

4 - Sistema celular real com as distribuições de células e de tráfego obtidas em medidas de campo com a colaboração de alguma operadora de sistema celular.

5 - Considerar o ambiente como uma combinação dos ambientes Rayleigh e Log-Normal, ambiente de Suzuki, como também o ambiente Rice para microcélulas.

6 - Relacionar as probabilidades de interferência de canal adjacente com a relação Portadora/ICA.

REFERÊNCIAS

- [1] Jakes Jr., W. C., *Microwave Mobile Communications*, John Wiley & Sons, New York, 1974.
- [2] Parsons, J. D., Gardiner, J.G., *Mobile Communications Systems*, Blakie and Son Ltd., London, 1989.
- [3] Lee, W. C. Y., *Mobile Communications Engineering*, MacGraw-Hill Book Co., New York, 1982.
- [4] Lee, W. C. Y., *Mobile Communications Design Fundamentals*, Howard W. Sams & co., Indianapolis, 1986.
- [5] Calhoun, G., *Digital Cellular Radio*, Artech House, Norwood, 1988.
- [6] Yacoub, M.D., *Foundations of Mobile Radio Engineering*, CRC Press, Boca Raton, USA , a ser publicado.
- [7] Young, W.R., "Advanced Mobile Phone Service Introduction, Background and Objectives", *The Bell System Technical Journal*, January 1979.
- [8] Lee, W. C. Y., "Elements of Cellular Mobile Radio Systems", *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, vol. vt - 35, May 1986.
- [9] Yacoub, M. D., *Mobile Radio with Fuzzy Cell Boundaries*, PhD Thesis, University of Essex, England, May 1988.
- [10] Cattermole, K. W., Yacoub, M. D., "Radio Propagation Model for Adjacent Cells in a Mobile Radio System", a ser publicado.
- [11] Leonardo, E. J., *Métodos Estatísticos para a Determinação da Área de Cobertura de Células e Microcélulas em Sistemas de Rádio Móvel*, Tese de Mestrado, FEE Unicamp, Julho de 1992.
- [12] Leonardo, E. J., Yacoub, M. D., "Métodos Estatísticos para a Determinação da Área de Cobertura de Uma Célula em um Sistema de Rádio Móvel", *X Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Brasília, 1992, pp.539 - 544.

- [13] Egli, J., "Radio Propagation above 40 Mc/s over Irregular Terrain", *Proc. IRE* 45, 1957, pp. 1383-1391.
- [14] Bullington, K., "Radio Propagation at Frequencies above 30 Mc/s", *Proc. IRE* 35, 1947, pp. 1122-1136.
- [15] Okumura, Y., Ohmori, E., Kawano, T., Fukuda, K., "Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land Mobile Service", *Rev. Electr. Commun. Lab.* 16, 1968, pp. 825-873.
- [16] Hata, M., "Empirical Formula for Propagation Loss in Land-Mobile Radio Services", *IEEE Trans. on Vehicular Technology* 29, 1980, pp. 317-325.
- [17] Reudink, D. O., *Large-Scale Variations of the Average Signal in MicroWave Mobile Communications*, John Wiley & Sons, New York, 1974, pp. 79-131.
- [18] Srivastava, N., Rappaport, S., "Models for Overlapping Coverage Areas in Cellular and Micro-Cellular Communication Systems", *Globecom 91*, 1991, 26.3.1 -26.3.4, pp. 890-893.
- [19] Garcia-Hernandez, C.F., Hughes, C.J., "Simulation of Handovers Conditions for Cellular Radio Systems", *Electronics Letters*, 14th August 1986, Vol. 22 n^o 17, pp. 904-905.
- [20] Cattermole, K. W., *Alternative Routing in Cellular Mobile Radio*, Univ. of Essex, International Publication, 1986.
- [21] Avellaneda, O., Panda, R., Brody, G., "Traffic Modeling of a Celular Mobile Radio System", *ITC II*, Kyoto, September 1985, pp. 2.4.B-4 - 2.4.B-4-7.
- [22] Mencia, J. C. E., *Desempenho de Um Sistema de Comunicações Móveis com a Variação do Limiar de Bloqueio*, Tese de Mestrado, FEE Unicamp, Janeiro de 1991.
- [23] Eklundh, B., "Channel Utilization and Blocking Probability in a Cellular Mobile Telephone System with Directed Retry", *11th ITC*, April 1985.
- [24] Karlsson, J., Eklundh, "A Cellular Mobile Telephone System with Load Sharing - An Enhancement of Directed Retry", *IEEE Trans. on Commun.*, Vol COM-37, no. 5, May 1989, pp. 530-534.
- [25] Arazi, B., "New Channel Assigment Strategy in Cellular Mobile Radio Communication Systems", *IEEE Proc.* Vol. 133, Pt. F, n^o 16, October 1986, pp. 569-575.

- [26] Boucher, L., Hafez, H.M., " Evaluation of VHF, SSB, and ACSSB Radio Systems in the Interference Context of the Land Mobile Bands", *IEEE Trans. on Commun.*, April 1990, pp. 244-250.
- [27] Chan, G., " Interference Analysis of a Land Mobile Cellular Radio System", *Eletromagnetic Compatibility 1985, 6th Symposium and Technical Exhibition on Eletromagnetic Compability*, Zurich, March 1985, pp. 469-474.
- [28] Cox, D. C., " Co-Channel Interference Considerations in Frequency Reuse Small - Coverage - Area - Real Systems", *IEEE Transactions on Communications*, vol. com-30, n^o 1, January 1982, pp. 135-142.
- [29] Huges, C.J., Appleby, M.S., " Definition of a Celular Mobile Radio System", *IEE Proceedings - F, Communications, Radar and Signal Processing*, Vol. 132, Part F, n^o 5 , August 1985.
- [30] Ariyavisitakul, S., Liu, T., " Characterizing the Effects of Nonlinear Amplifiers on Linear Modulation for Digital Portable Radio Communications", *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, Vol. 39, n^o 4, November 1990.
- [31] Raith, K., Uddenfeldt, J., " Capacity of Digital Cellular TDMA Systems", *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, Vol. 40, n^o 2, May 1991.
- [32] Lee, W. C. Y., " Overview of Cellular CDMA", *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, Vol 40, n^o 2, May 1991.
- [33] Jacobs, I. M., Viterbi, A. J., Weaver, L. A., Padovani, R., and Wheatley III, C. E., " On the Capacity of a Cellular CDMA System", *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, Vol. 40, n^o 2, May 1991.
- [34] Branquinho, O. C., *Simulador de Efeito de Multipercurso em Canal de Rádio Móvel*, Tese de Mestrado, FEE Unicamp, Agosto de 1991.
- [35] Gradshteyn, I. S., Ryzhik, I. M., *Table of Integrals, Series, and Products*, Academic Press, New York, 1980.
- [36] Papoulis, A., *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, McGraw-Hill Book Co., Singapore, 1991.
- [37] Keffer, N.F., Yacoub, M.D., " Interferência de Cocanal e Distribuição de Tráfego para Sistemas de Comunicações Móveis em Ambiente Rayleigh", *X Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Brasília, 1992, pp. 515 - 520.