



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
DEPARTAMENTO DE COMUNICAÇÕES

Eficiência de Reuso de Frequências e Capacidade em Sistemas CDMA Multi-taxas

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da
Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Álvaro Augusto Machado de Medeiros

Engenheiro Eletricista — UFRN

Orientador:

Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub

Co-orientador:

Dr. César Kyn d'Ávila

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub	FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Sandro Adriano Fasolo	INATEL
Prof. Dr. Paulo Cardieri	FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. João Batista Tadanobu Yabu-uti	FEEC/UNICAMP

Dezembro de 2002

Agradecimentos

- Ao Professor Michel Daoud Yacoub pelo apoio, confiança e dedicação na tarefa de orientação;
- Ao Dr. César Kyn d'Ávila pelas correções e imprescindíveis contribuições para realização deste trabalho;
- À CAPES pelo suporte financeiro;
- Aos membros da banca, Professores Doutores Fasolo, Cardieri e Yabu-uti pela paciência e atenção;
- Aos colegas do Laboratório WiTek, pelas críticas, correções, sugestões e dicas de $\text{\LaTeX}$;
- Aos colegas da FEEC e amigos da UNICAMP que, de uma maneira ou de outra, tornaram agradável a minha estadia em Campinas;
- Aos parentes que acompanharam todo o trabalho, em especial aos meus irmãos Fabiana, Marcos, Flávia e à tia Sissy;
- Finalmente, aos meus pais, pelo empenho e sacrifício na minha formação pessoal e profissional.

Resumo

Neste trabalho é desenvolvido um estudo da Eficiência de Reuso de Frequências (F) para sistemas CDMA multi-taxas. Esse parâmetro é de fundamental importância no planejamento de sistemas celulares CDMA, dado a sua presença no cálculo da capacidade desses sistemas. Esse parâmetro é deduzido considerando-se os diferentes tipos de serviço com suas respectivas taxas de transmissão e requisitos de qualidade de serviço. A análise é feita para o enlace direto, em virtude de este ser o enlace limitante para sistemas de Terceira Geração (3G). A expressão da eficiência de reuso mostra uma grande variação do parâmetro para baixos valores de *jamming margin*, isto é, para altas taxas de transmissão e/ou fortes restrições de qualidade de serviço. Essa expressão mostra também um comportamento quase constante para altos valores de *jamming margin*. Isto leva à conclusão de que a estimação deste parâmetro deve ser a mais acurada possível para o correto dimensionamento de sistemas sem fio multi-taxas.

Outra contribuição deste trabalho é uma nova expressão para o cálculo da capacidade de sistemas 3G. Ela é obtida com base na fórmula da capacidade de pólo conjuntamente com a expressão da eficiência de reuso. Esta nova equação contempla casos em que o sistema opera com potências variadas nas diferentes Estações Rádio-Base, além de considerar uma definição mais precisa da interferência gerada na célula servidora.

Ao final, são mostrados exemplos que utilizam esta nova fórmula para cálculo da capacidade em sistemas WCDMA e 1xEVDO.

Abstract

In this work, a study on the Frequency Reuse Efficiency (F) for CDMA multirate systems has been developed. The determination of the F parameter is of paramount importance for it has a direct impact on the capacity of CDMA systems. This parameter is derived considering the different types of services with their respective transmission rates and quality of service requirements. The analysis is concentrated on the forward link, since the Third Generation (3G) systems are downlink limited. The expression for the frequency reuse efficiency shows a strong variation of this parameter with lower values of jamming margin, that is for high data rates and/or stringent quality of service restrictions. It shows also that this is nearly constant for higher values of jamming margin. These results lead to the conclusion that the estimation of this parameter must be very accurate, in order to guarantee the proper dimensioning of wireless multirate systems.

Another contribution of this work is the new expression for the capacity estimation for 3G systems. It is obtained based on the pole capacity equation simultaneously with the frequency reuse efficiency expression. This new equation comprises cases in which the system has Base Stations with different downlink transmission powers, as well as a more precise definition of the interference generated within the serving cell.

Finally, some application examples are presented, which use this new formula for the WCDMA and 1xEVDO systems.

Para Dona Penha e Seu Bernardo

Conteúdo

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
1 Introdução	1
1.1 Histórico	1
1.2 A Tecnologia CDMA	3
1.3 Sistemas de Terceira Geração	4
1.3.1 WCDMA	4
1.3.2 cdma2000 (1xEVDO)	5
1.3.3 Interferência e capacidade em sistemas 3G	6
1.4 Proposta de trabalho	7
1.5 Estrutura da Dissertação	7
2 Eficiência de Reuso e Cálculo da Capacidade em Sistemas 2G	9
2.1 Enlace reverso	10
2.2 Enlace direto	13
2.3 Cálculo da capacidade em sistemas 2G	16
2.3.1 Capacidade do Enlace Reverso	16
2.3.2 Capacidade do Enlace Direto	18
2.4 Considerações sobre o cálculo da capacidade em Sistemas 2G	19
2.5 Conclusões	20

3	Eficiência de Reuso de Frequências em Sistemas com Serviços Multi-taxas	22
3.1	Interferência no enlace direto	22
3.2	Eficiência de reuso de frequências	31
3.3	Conclusões	35
4	Cálculo da Capacidade em Sistemas com Serviços Multi-taxas	37
4.1	Cálculo da capacidade através da fórmula de capacidade de pólo	37
4.2	Considerações sobre a fórmula da capacidade de pólo	39
4.3	Aplicações da fórmula de capacidade	46
4.3.1	WCDMA	47
4.3.2	cdma2000 (1xEVDO)	48
4.3.3	Comparação entre os Sistemas WCDMA e 1xEVDO	50
4.3.4	Outras aplicações	50
4.4	Conclusões	51
5	Considerações Finais	52
5.1	Trabalhos Futuros	53
	Referências Bibliográficas	54

Lista de Figuras

2.1	<i>Interferência no enlace reverso.</i>	10
2.2	<i>Interferência no enlace direto.</i>	14
2.3	<i>Soft capacity para célula central quando as células estão igualmente carregadas (a) e quando há menos interferência nas células vizinhas (b). .</i>	18
3.1	<i>Parâmetro L_k normalizado em função da distância normalizada da estação rádio-base.</i>	25
3.2	<i>Valores de $\overline{L_k}$ e valores de $L_{k \max}$ (em parênteses) para uma rede de 4 anéis e $\alpha = 4$.</i>	26
3.3	<i>Variação de $L_k/L_{k \max}$ para a célula central de uma rede de 4 anéis, $\alpha = 4$ e ERB situada em $(X, Y) = (0, 0)$.</i>	27
3.4	<i>Variação de $L_k/L_{k \max}$ para a célula do quarto anel de uma rede de 4 anéis, $\alpha = 4$ e ERB situada em $(X, Y) = (0, 0)$.</i>	28
3.5	<i>Variação de $L_k/L_{k \max}$ (eixo Z) para a célula central de uma rede de 4 anéis, $\alpha = 2$ e ERB situada em $(X, Y) = (0, 0)$.</i>	28
3.6	<i>Variação de $L_k/L_{k \max}$ (eixo Z) para a célula central de uma rede de 4 anéis, $\alpha = 3$ e ERB situada em $(X, Y) = (0, 0)$.</i>	29
3.7	<i>Variação de $L_k/L_{k \max}$ (eixo Z) para a célula central de uma rede de 4 anéis, $\alpha = 4$ e ERB situada em $(X, Y) = (0, 0)$.</i>	29
3.8	<i>Variação de $L_k/L_{k \max}$ (eixo Z) para a célula do quarto anel de uma rede de 4 anéis, $\alpha = 4$ e ERB situada em $(X, Y) = (0, 0)$.</i>	30
3.9	<i>Variação de $\overline{L_k}$ e desvio-padrão com relação à distância da ERB, para a célula central de uma rede de 4 anéis, $\alpha = 4$.</i>	30

3.10	Gráfico de F_k por χ_k para $\varepsilon_k = 0,5$, $\alpha = 2$ e diferentes valores de L_k normalizado.	32
3.11	Gráfico de F_k por χ_k para $\varepsilon_k = 0,5$, $\alpha = 3$ e diferentes valores de L_k normalizado.	32
3.12	Gráfico de F_k por χ_k para $\varepsilon_k = 0,5$, $\alpha = 4$ e diferentes valores de L_k normalizado.	33
3.13	Gráfico de F_k por χ_k para $\varepsilon_k = 0$, $\alpha = 4$	33
3.14	Gráfico de F_k por χ_k para $\varepsilon_k = 1$, $\alpha = 4$	34
4.1	Gráfico do fator de carga em função de I_k (linha tracejada) e L_k (linha sólida) para $P_T^{(i)} = P_T^{(s)} \forall i$, $\varepsilon_k = 0,5$ e $\chi_k = 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 50, 100$. A seta indica o sentido de crescimento de χ_k	42
4.2	Gráfico do fator de carga em função de I_k (linha tracejada) e L_k (linha sólida) para $P_T^{(i)} = 0,5P_T^{(s)} \forall i$, $\varepsilon_k = 0,5$ e $\chi_k = 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 50, 100$. A seta indica o sentido de crescimento de χ_k	43
4.3	Gráfico do fator de carga em função de I_k (linha tracejada) e L_k (linha sólida) para $P_T^{(i)} = 2P_T^{(s)} \forall i$, $\varepsilon_k = 0,5$ e $\chi_k = 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 50, 100$. A seta indica o sentido de crescimento de χ_k	44
4.4	Gráfico da contribuição no fator de carga em função da eficiência de reuso para $P_T^{(i)} = P_T^{(s)} \forall i$, $\varepsilon_k = 0,5$ e $\chi_k = 100, 50, 20, 10, 5, 4, 3, 2, 1$	45
4.5	Gráfico da contribuição no fator de carga em função da distância para o sistema WCDMA com $\varepsilon_k = 0,5$ e $R_k = 12, 2; 57, 6; 128; 384$ kbps em uma célula central de rede de 4 anéis. A linha tracejada representa $\rho_{max} = 0,5$	47
4.6	Gráfico da contribuição no fator de carga em função da distância para 1xEVDO com $\varepsilon_k = 0,5$ e $R_k = 9, 6; 76, 8; 144; 384$ kbps em uma célula central de rede de 4 anéis. A linha tracejada representa $\rho_{max} = 0,5$	49

Lista de Tabelas

2.1	<i>Valores de α para diferentes ambientes.</i>	11
2.2	<i>Valores de F para o enlace reverso.</i>	13
2.3	<i>Valores de ε para diferentes ambientes celulares.</i>	15
3.1	<i>Valores de $\overline{L}_k$ e $L_{k \max}$ para diferentes ambientes de propagação.</i>	24
4.1	<i>Exemplos de serviços para o sistema WCDMA.</i>	47
4.2	<i>Exemplos de serviços para o sistema 1xEVDO.</i>	49

Capítulo 1

Introdução

Desde a sua introdução no mercado mundial, o serviço de telefonia móvel celular vem surpreendendo o mercado pelo crescimento explosivo e por seu potencial inovador. A rápida evolução tecnológica vem propiciando não só uma melhoria na qualidade do serviço de voz, mas também a inserção de novos serviços como vídeo e transmissão de dados [1].

Entretanto, esse crescente desenvolvimento gera uma demanda maior de usuários e um aumento da complexidade dos sistemas, o que por sua vez exige estudos cada vez mais aprofundados em questões de dimensionamento dos sistemas e gerenciamento de tráfego.

1.1 Histórico

O conceito de telefonia celular foi introduzido em 1947 pela AT&T Bell Laboratories com um sistema de comunicação móvel que utilizava modulação em amplitude (AM). Com o baixo desempenho desse sistema, a AT&T Bell Laboratories implementou, em 1962, um sistema de modulação em frequência (FM) na faixa de VHF e com canais de 30 kHz. Este sistema teve sua primeira utilização comercial em 1979, tendo o nome de sistema AMPS (*Advanced Mobile Phone System*). Em conjunto com o AMPS, surgiram outros sistemas bastante semelhantes, onde as principais diferenças estavam na faixa do espectro de frequência utilizada e no espaçamento entre canais. Essa Primeira Geração de sistemas móveis celulares caracterizava-se basicamente por ser analógica

e utilizar a técnica de acesso múltiplo por divisão em frequência (FDMA - *Frequency Division Multiple Access*), onde os canais de transmissão são subdivisões no espectro de frequências.

Com o aumento da demanda, foi necessário desenvolver novos sistemas celulares com tecnologia digital que, além da maior capacidade, oferecessem vantagens como técnicas de codificação digital de voz e maior eficiência espectral. Surgiu então a Segunda Geração (2G) de sistemas celulares. Os principais sistemas pertencentes a essa geração utilizam a técnica de acesso múltiplo por divisão no tempo (TDMA - *Time Division Multiple Access*), onde canais FDMA apresentam subdivisões na forma de slots de tempo, e a técnica de acesso múltiplo por divisão por código (CDMA - *Code Division Multiple Access*), baseada no espalhamento espectral do sinal, onde códigos diferentes são designados para os usuários e todos os sinais codificados são transmitidos no mesmo espectro de frequências e ao mesmo tempo. Dentre os sistemas que utilizam a técnica TDMA destacam-se o IS-136, o PDC (*Pacific Digital Cellular*) e o GSM (*Global System for Mobile Communications*) e a técnica CDMA tem como principal representante o IS-95.

O acelerado desenvolvimento tecnológico e a necessidade de novos serviços impulsionaram a criação de novos sistemas que garantissem altas taxas de dados com uma utilização do espectro mais eficiente. A Terceira Geração (3G) de sistemas celulares, chamada pela União Internacional de Telecomunicações (ITU - *International Telecommunications Union*) de IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications - 2000*) [2], é formada por sistemas celulares que devem ser caracterizados principalmente por:

- Cobertura e mobilidade completas para taxas de 144 kbps, preferivelmente 384 kbps;
- Cobertura e mobilidade limitadas para taxas de 2 Mbps;
- Maior eficiência espectral em relação aos sistemas existentes;
- Maior flexibilidade para introdução de novos serviços.

Dentre os sistemas propostos se destacam aqueles que adotam a tecnologia de acesso CDMA, principalmente o WCDMA (*Wideband CDMA* - CDMA Banda Larga) e o

cdma2000. O WCDMA segue uma padronização definida principalmente pelas empresas ligadas ao GSM e ao PDC, enquanto o cdma2000 segue a padronização do sistema IS-95 afim de manter a compatibilidade com o mesmo.

1.2 A Tecnologia CDMA

Nos sistemas que utilizam a técnica CDMA, todos os usuários transmitem na mesma banda de frequências simultaneamente. Entretanto, a cada usuário é designado uma sequência de código único (código de espalhamento) usado para codificar a sua informação. A estação rádio-base (ERB), conhecendo as seqüências de código de cada usuário, decodifica o sinal recebido e recupera a informação original, graças ao fato de que as correlações cruzadas entre o código do usuário desejado e os códigos dos outros usuários têm valores baixos. Como a banda do sinal codificado é muito maior que a banda mínima necessária para transmissão do sinal de informação, o processo de codificação aumenta o espectro do sinal e é então conhecido como espalhamento espectral.

No caso ideal, o melhor desempenho é obtido com códigos de correlação cruzada nula, isto é, códigos ortogonais. Na realidade, as imperfeições do canal, como o efeito de multi-percurso, introduzem um certo nível de correlação entre os sinais codificados. Assim os sinais dos outros usuários aparecerão para o usuário alvo como ruído, que é a interferência devido ao múltiplo acesso. Portanto, esse a potência desse tipo de ruído que afeta o sinal desejado é linearmente proporcional ao número de usuários no sistema. Assim, quanto maior o número de usuários admitidos no sistema, maior será a degradação na comunicação no sistema. O problema se torna ainda mais sério nas bordas da célula, onde os usuários ali localizados necessitam de mais potência para manter uma relação sinal-ruído satisfatória, o que pode aumentar a interferência devido ao múltiplo acesso para os outros usuários. Conseqüentemente, temos um compromisso entre a capacidade e a cobertura de uma célula em sistemas CDMA.

Para garantir então a qualidade de sinal (relação sinal-interferência) aos assinantes, o cálculo da capacidade e a predição da cobertura devem levar em consideração a distribuição do tráfego ao longo das células, que está associada diretamente ao **fator de**

eficiência de reuso de frequências (F). Esse fator determina a capacidade do sistema e depende do ambiente de propagação e da topologia da rede celular, necessitando de um cálculo preciso, principalmente nas etapas de planejamento [3].

1.3 Sistemas de Terceira Geração

Os principais sistemas de Terceira Geração (3G) que estão sendo implantados atualmente são o WCDMA e o cdma2000, tendo este último seguido a linha de desenvolvimento tecnológico da Qualcomm chamada de 1xEVDO. Ambos os sistemas utilizam a tecnologia CDMA para múltiplo acesso. Portanto esses sistemas necessitarão, assim como o sistema de Segunda Geração IS-95, de uma análise mais exata do fator de eficiência de reuso de frequências, para fins de dimensionamento da capacidade e da cobertura.

1.3.1 WCDMA

O sistema WCDMA utiliza a técnica de múltiplo acesso CDMA por seqüência direta [4] (*Direct Sequence CDMA* - DS-CDMA), onde a informação do usuário é espalhada multiplicando-a por uma seqüência pseudo-aleatória de bits (chamados chips) derivada dos códigos de espalhamento do CDMA. Para suportar altas taxas de bit, o WCDMA faz uso de um fator de espalhamento variável e de conexões com múltiplos códigos. A taxa de chips utilizada é de 3,84 Mcps, o que leva a uma banda de aproximadamente 5 MHz (banda larga).

O WCDMA [5] admite dois modos básicos de operação: bidirecional por divisão em frequência (FDD - *Frequency Division Duplex*) e bidirecional por divisão no tempo (TDD - *Time Division Duplex*). No modo FDD, portadoras distintas de 5 MHz são usadas para os enlaces direto (ERB - unidade móvel) e reverso (unidade móvel - ERB), respectivamente. Já no modo TDD, apenas uma portadora de 5 MHz é dividida no tempo entre os enlaces direto e reverso.

No sistema WCDMA é possível a operação de estações rádio-bases assíncronas, diferentemente do padrão CDMA de segunda geração IS-95, onde há necessidade de uma referência global como o GPS (*Global Positioning System*), facilitando a implementação

de microcélulas e células em interiores de prédios, onde é mais difícil conseguir um sinal GPS. O WCDMA emprega detecção coerente [6] nos enlaces direto e reverso, baseada no uso de um piloto multiplexado no tempo dedicado ao usuário ou em um canal piloto comum. O WCDMA também foi projetado de modo a possibilitar a implementação de avançados conceitos de recepção na tecnologia CDMA, como detecção multi-usuário e antenas adaptativas.

1.3.2 cdma2000 (1xEVDO)

O sistema cdma2000 [7] é uma evolução natural do sistema IS-95. Para ambas tecnologias, está definida uma taxa de espalhamento de 1,2288 Mcps para uma banda de frequências de 1,25 MHz (banda estreita). Para a evolução do sistema IS-95 à Terceira Geração, foram definidas duas tecnologias: a tecnologia MC-CDMA (*Multi-Carrier CDMA* - CDMA multi-portadora) e a tecnologia 1xEVDO (1x *EVolution Data Optimized*). A primeira opção foi praticamente abandonada, sendo o sistema 1xEVDO a principal opção atual de evolução de Terceira Geração para as operadoras IS-95.

O sistema 1xEVDO [8], que utiliza apenas uma portadora de 1,25 MHz, como no sistema IS-95, parte da premissa de que voz e dados possuem requisitos de qualidade diferentes, tornando ineficiente sistemas que combinarem os dois serviços. Assim, no 1xEVDO uma portadora é dedicada completamente para dados, sendo compartilhadas por todos usuários. O enlace direto do sistema 1xEVDO suporta taxas de dados dinâmicas, onde a taxa de transmissão pode ser constantemente variada de acordo com a variação da relação sinal-ruído do usuário.

No sistema 1xEVDO, as estações rádio-bases devem estar sincronizadas, como no sistema IS-95, havendo a necessidade de um sinal de referência pelo Sistema de Posicionamento Global (GPS). O sistema 1xEVDO emprega detecção coerente no enlace reverso, com um canal piloto multiplexado por código. No enlace direto, o canal piloto é comum a todos os usuários, sendo transmitido continuamente.

1.3.3 Interferência e capacidade em sistemas 3G

Dentro desses dois principais sistemas 3G, todos baseados na tecnologia CDMA, temos que as faixas de frequências em que eles funcionarão são significativamente mais altas que aquelas utilizadas pela maioria dos sistemas 2G (abaixo de 1 GHz). Esse fato demonstra uma dificuldade maior no planejamento e implementação dos sistemas 3G, pois a influência dos obstáculos entre transmissor e receptor torna-se mais significativa e leva à necessidade de utilização de ferramentas de predição de cobertura e análise de interferências mais precisas. Além da limitação por interferências inerente aos sistemas celulares, os sistemas 3G terão também maior limitação de potência que os sistemas 2G, devido às condições de propagação nessa faixa de frequências serem mais severas que em faixas de frequência mais baixa [9].

Outro ponto importante a considerar se refere ao fato de que os dados que trafegarão pelas redes são predominantemente de natureza assimétrica, como por exemplo *streaming* de áudio e vídeo, correio eletrônico e acesso à *Internet*. Estes serviços necessitam de maior capacidade no enlace direto do que no enlace reverso.

Esses novos serviços definidos para os sistemas 3G são, em sua grande maioria, serviços caracterizados por altas taxas de transmissão e rigorosos requisitos de qualidade de serviço, como por exemplo taxa de erro de bit e tempo de atraso menores. Este fato implica em limiares de Relação Sinal-Interferência (SIR - *Signal-to-Interference Ratio*) mais restritivos para funcionamento satisfatórios destes serviços.

A fim de garantir níveis de SIR que atendam aos requisitos de cada serviço, faz-se necessário um dimensionamento mais preciso da quantidade de usuários em cada serviço, bem como a cobertura de cada célula. Assim, a determinação da capacidade do sistema é de grande necessidade para o funcionamento adequado da rede e o atendimento satisfatório ao usuário. Conseqüentemente, existe a necessidade de um cálculo preciso do fator de eficiência de reuso de frequências [10], dada a grande influência deste parâmetro no cálculo da capacidade de usuários no sistema e de qualidade do sinal recebido pelo móvel.

1.4 Proposta de trabalho

A proposta desta dissertação de mestrado é o estudo da eficiência de reuso de frequências no enlace direto para sistemas com múltiplas taxas e a sua influência na capacidade dos sistemas 3G e de gerações superiores. Os trabalhos já realizados sobre esse parâmetro concentram-se no enlace reverso [11, 12, 13] e para serviços de voz [14], isto é, para sistemas 2G. Desta forma, este trabalho contribui para a melhoria das técnicas de planejamento dos sistemas que serão implementados largamente no futuro.

Para a referida análise da capacidade, uma nova equação de capacidade de pólo [15] é proposta. Essa fórmula contempla os casos em que o sistema opera com potências variadas nas diferentes ERBs, além de considerar uma definição mais precisa da interferência gerada na célula servidora. Desenvolvem-se ainda exemplos no cálculo da capacidade de sistemas WCDMA e 1xEVDO.

As contribuições deste trabalho são:

- Expressões para eficiência de reuso de frequências para o enlace direto nos sistemas 2G;
- Expressões para eficiência de reuso de frequências para sistemas com serviços multi-taxas (3G e possíveis aplicações para sistemas de gerações superiores);
- Nova fórmula de capacidade baseada na equação de capacidade de pólo que leva em consideração situações onde as ERBs da rede celular possuem potências diferentes e uma definição mais precisa da interferência gerada na mesma célula;
- Exemplos de aplicação da nova fórmula em sistemas 3G.

1.5 Estrutura da Dissertação

A dissertação será estruturada como se segue:

- Capítulo 2 - Definição e análise da eficiência de reuso de frequências para os enlaces direto e reverso e cálculo da capacidade para sistemas 2G. Esse é um capítulo fundamental pois além de rever uma série de conceitos importantes para

os desenvolvimentos Capítulos 3 e 4, ele mostra a importância do parâmetro F no dimensionamento de sistemas CDMA.

- Capítulo 3 - Eficiência de reuso de frequências no enlace direto nos sistemas multi-taxas. Neste capítulo, serão desenvolvidas as análises sobre a eficiência de reuso no enlace direto levando em consideração múltiplos serviços, com taxas variadas.
- Capítulo 4 - Cálculo e dimensionamento de capacidade em sistemas multi-taxas utilizando a eficiência de reuso de frequências. Neste capítulo, será desenvolvida a nova fórmula de capacidade baseada na equação da capacidade de pólo, sendo apresentados ainda alguns exemplos de aplicação e cálculos relativos à redes celulares 3G com tecnologia WCDMA e 1xEVDO.
- Capítulo 5 - Considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Eficiência de Reuso e Cálculo da Capacidade em Sistemas 2G

A eficiência de reuso de frequências F é um parâmetro adimensional dos sistemas CDMA que representa a potência relativa à potência total recebida (a potência proveniente de todas as células do sistema) que é referente à célula servidora. Sendo assim, esse parâmetro é definido como [16]:

$$F = \frac{P_{sc}}{I_{oc} + P_{sc}} \quad (2.1)$$

onde P_{sc} denota a potência total no receptor que é originada na sua célula servidora e I_{oc} representa a potência total gerada pelas outras células do sistema. O valor de F está definido entre 0 e 1. Quando F se refere ao enlace reverso, os valores de P_{sc} e I_{oc} são medidas relativas à estação rádio-base. Já quando F se refere ao enlace direto, os valores de P_{sc} e I_{oc} são medidas relativas à unidade móvel.

Como já introduzido no Capítulo 1, o uso de códigos ortogonais e pseudo-aleatórios procuram garantir que não ocorra nenhuma interferência. No caso em que a ortogonalidade possa ser mantida, temos uma eficiência de reuso de frequências de 100%, ou seja, $F = 1$. Contudo, essa situação ideal não acontece na prática, fazendo com que o sistema trabalhe num ambiente de interferências.

Este capítulo descreve a análise da eficiência de reuso de frequências para os enlaces direto e reverso, bem como a sua importância na determinação da capacidade de um sistema CDMA.

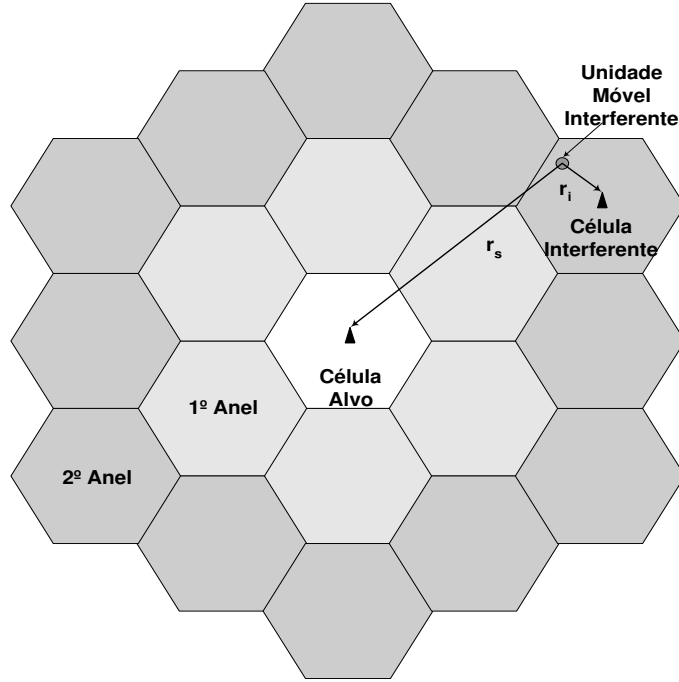


Figura 2.1: *Interferência no enlace reverso.*

2.1 Enlace reverso

O cenário do enlace reverso é caracterizado por múltiplas fontes de transmissão (unidades móveis) e apenas um receptor (estação rádio-base), o que leva ao cálculo de apenas um valor de F para a célula. Este enlace opera de forma assíncrona, propiciando a perda de ortogonalidade gerada pelos códigos que separam cada usuário. Assim, todos os usuários são interferentes potenciais e algoritmos de controle de potência eficientes devem ser utilizados a fim de otimizar a capacidade do enlace reverso. Um esquema que representa a interferência no enlace reverso é mostrada na Figura 2.1.

Em virtude do controle de potência no enlace reverso, os sinais de todos os usuários ativos de uma dada célula chegam à ERB com potências aproximadamente constantes e iguais. Considerando s a célula servidora (célula alvo) e i a célula interferente, em uma rede de M células, temos que a potência total dos usuários ativos na célula s é igual a uma potência constante φ vezes o número de usuários, considerando o controle

Ambiente	α
Espaço Livre	2,00
Terreno Plano	4,00
Área Aberta (Lee)	4,35
Área Suburbana (Lee)	3,84
Área Urbana (Hata)	3,52
Área Urbana (Newark)	4,31
Área Urbana (Tóquio)	3,05
Área Urbana (Rio de Janeiro)	2,16

Tabela 2.1: Valores de α para diferentes ambientes.

de potência ideal. Assim, para a célula s :

$$P_{sc} = \varphi \int \rho(A_s) dA_s \quad (2.2)$$

onde φ é uma constante que inclui a potência transmitida pelo móvel, fator de atividade de voz e outros, $\rho(A_s)$ é a densidade de tráfego (usuários por área) da célula s cuja área é A_s . Observe que $\int \rho(A_s) dA_s = N_s$, onde N_s é o número de usuários ativos na célula s .

Dado agora que, para qualquer usuário ativo k fora de cobertura da célula alvo s , φ é a sua potência controlada pela ERB i , então a potência transmitida da unidade móvel a uma distância r_i da sua estação servidora i é, considerando o controle de potência ideal, φr_i^α , onde α é o expoente de perda de percurso. A potência interferente recebida na estação s da célula alvo, a uma distância r_s do usuário k é atenuada por essa distância. Então a potência interferente gerada pelo usuário k é $\varphi (r_i/r_s)^\alpha$. Para todos os usuários da célula i , a potência interferente I_i na ERB s é:

$$I_i = \varphi \int \rho(A_i) (r_i/r_s)^\alpha dA_s \quad (2.3)$$

A Tabela 2.1 mostra alguns valores encontrados na literatura [17] para o expoente de perda de percurso em diferentes ambientes. Assim, a interferência total I_{oc} gerada pelas $M - 1$ células é igual a:

$$I_{oc} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq s}}^M \varphi \int \rho(A_i) (r_i/r_s)^\alpha dA_s \quad (2.4)$$

onde A_i é a área da célula i . Aplicando (2.2) e (2.4) em (2.1), temos:

$$F_s = \frac{\int \rho(A_s) dA_s}{\sum_{i=1}^M \int \rho(A_i) (r_i/r_s)^\alpha dA_i} \quad (2.5)$$

A equação (2.5) mostra que a eficiência de reuso de frequências depende tanto da distribuição de tráfego, quanto das condições de propagação. Para distribuição de tráfego uniforme, isto é $\rho(A_s) = N_s/A_s$, e um número infinito de células, todas as células apresentam uma mesma eficiência de reuso de frequências [13].

Alguns valores para eficiência de reuso de frequências são apresentados na Tabela 2.2 encontrada em [17] para diferentes coeficientes de perda de percurso α , tráfego uniforme e ambiente com desvanecimento lognormal com desvio padrão σ . Neste caso, a expressão para F no enlace reverso é dada por [17]:

$$F_s = \frac{\int \rho(A_s) dA_s}{\sum_{i=1}^M \int \exp \left[\left(\frac{\sigma \ln 10}{10} \right)^2 \right] \left\{ 1 - Q \left[\frac{10\alpha \log(r_s/r_i)}{\sqrt{2}\sigma^2} - \sqrt{2}\sigma^2 \frac{\ln 10}{10} \right] \right\} \left(\frac{r_i}{r_s} \right)^\alpha \rho(A_i) dA_i} \quad (2.6)$$

onde $Q(\cdot)$ é a função definida como [18]:

$$Q(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^\infty \exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) dt \quad (2.7)$$

Observa-se na Tabela 2.2 que a eficiência de reuso de frequências varia muito em relação às condições de propagação, mantendo-se no intervalo de 0,2 a 0,8. Uma prática comum é adotar um valor padrão de F , que em geral é de valor 0,6. Isso ocasiona um erro de dimensionamento de cobertura e capacidade quando o valor de F for diferente do valor padrão adotado, como veremos na Seção 2.3. Métodos simples para cálculo exato da eficiência de reuso de frequência para distribuições de tráfego não-uniformes e para condições células dispostas em *layout* não-hexagonal podem ser encontrados nas Referências [10, 19, 20].

α	σ (dB)	F
3	0	0,5578
3	7	0,4340
3	8	0,3392
3	9	0,2415
4	0	0,6993
4	7	0,6253
4	8	0,5278
4	9	0,4093
5	0	0,7739
5	7	0,7301
5	8	0,6443
5	9	0,5291

Tabela 2.2: Valores de F para o enlace reverso.

2.2 Enlace direto

Para o enlace direto, temos uma comunicação formada por apenas um transmissor (ERB) e múltiplos receptores (unidades móveis), de onde se infere que deverão ser calculados múltiplos valores de F , dependentes da posição da unidade móvel. Esse tipo de comunicação, de um ponto para múltiplos pontos, facilita a implementação de uma transmissão síncrona, já que um canal de referência pode ser utilizado pela ERB para transmissão a todos os assinantes. Portanto, em uma situação ideal, o enlace direto não sofre interferência de múltiplo acesso. Entretanto, na prática, a interferência ainda ocorre neste enlace, devido [21]:

- ao fenômeno de multi-percurso, que produz réplicas atenuadas e atrasadas do sinal, que estão fora de sincronismo, e conseqüentemente, desprovidos de ortogonalidade e,
- aos sinais provenientes das outras células que não estão alinhados no tempo com o sinal desejado e, conseqüentemente, não são ortogonais ao sinal desejado.

Um esquema que representa a interferência no enlace direto é mostrada na Figura 2.2. Diferentemente do enlace reverso, não ocorre a situação de recepção com potência cons-

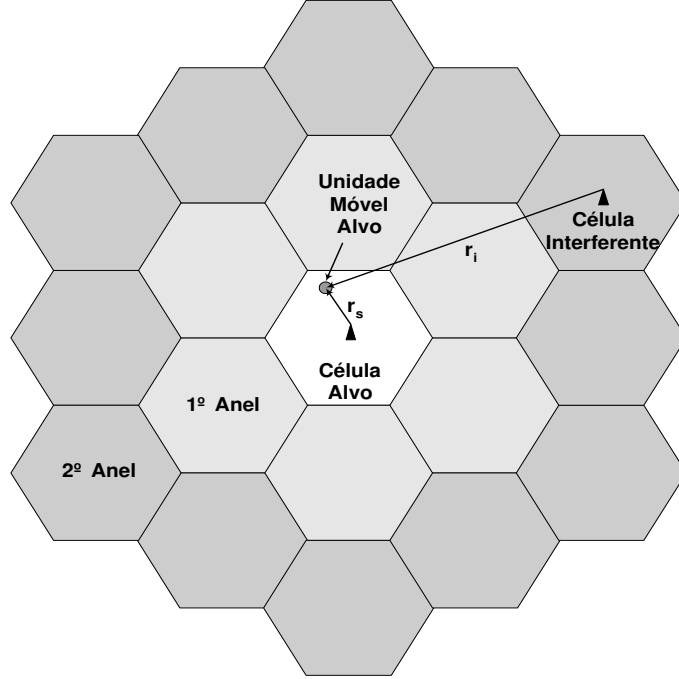


Figura 2.2: Interferência no enlace direto.

tante. A interferência agora é uma função da distância da unidade móvel às estações interferentes. Para o enlace direto, temos ainda que levar em consideração a utilização de canais de *overhead* (piloto, *paging*, sincronismo) e a inserção, no cálculo da interferência da mesma célula, de um fator de ortogonalização definido pelo ambiente de multi-percurso [22]. Esse fator irá definir quão ortogonais estão os canais entre si. Então, para o canal de tráfego do enlace direto, temos [17]:

$$P_{sc} = \frac{\beta P_T^{(s)} \varepsilon}{l_o r_s^\alpha} + \frac{(1 - \beta) P_T^{(s)} \varepsilon v}{N_{max} l_o r_s^\alpha} \int \rho(A_s) dA_s + \frac{(1 - \varepsilon)(1 - \beta) P_T^{(s)} v}{N_{max} l_o r_s^\alpha} \quad (2.8)$$

onde β é a proporção da potência total alocada para os canais de *overhead*, $P_T^{(s)}$ é a potência total da estação rádio-base servidora s , r_s é a distância do usuário k a ERB s , N_{max} é o número máximo de assinantes que podem ser alocados na célula, v é o fator de atividade dos usuários do sistema, l_o é o fator de proporcionalidade que define a perda básica de percurso, geralmente calculado a uma distância de 1 km ou 1 milha, e ε é o fator de ortogonalização ($\varepsilon = 0$ para canais perfeitamente ortogonais e $\varepsilon = 1$ para

Ambiente	$\bar{\varepsilon}$	σ_{ε}
Célula urbana pequena	0,429	0,159
Célula urbana grande	0,486	0,212
Célula rural grande	0,374	0,190

Tabela 2.3: Valores de ε para diferentes ambientes celulares.

ortogonalização nula). A Tabela 2.3 mostra alguns valores médios $\bar{\varepsilon}$ para o fator de ortogonalização e respectivos desvios-padrões σ_{ε} em diferentes ambientes celulares [22].

A equação (2.8) é composta da soma de três termos. O primeiro termo refere-se a interferência recebida pelo usuário gerada pelos canais de *overhead*. O segundo termo está relacionado com interferência gerada pelos canais de tráfego. Já o terceiro termo é a potência útil do usuário, relacionada com o seu canal de tráfego.

A interferência I_i gerada por cada célula i em uma estação móvel em s é dado por:

$$I_i = \frac{\beta P_T^{(i)}}{l_o r_i^\alpha} + \frac{(1 - \beta) P_T^{(i)} v}{N_{max} l_o r_i^\alpha} \int \rho(A_s) dA_s \quad (2.9)$$

onde $P_T^{(i)}$ é a potência total da estação rádio-base interferente i , r_i é a distância do usuário k a ERB i .

Assim, a interferência total I_{oc} gerada pelas $M - 1$ células é igual a:

$$I_{oc} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq s}}^M \left[\frac{\beta P_T^{(i)}}{l_o r_i^\alpha} + \frac{(1 - \beta) P_T^{(i)} v}{N_{max} l_o r_i^\alpha} \int \rho(A_s) dA_s \right] \quad (2.10)$$

Aplicando (2.8) e (2.10) em (2.1), e considerando $P_T^{(i)} = P_T^{(s)}$ para todo i temos:

$$F_s(x, y) = \frac{\frac{\beta N_{max}}{(1 - \beta)v} + \int \rho(A_s) dA_s + \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}}{\frac{\beta N_{max}}{(1 - \beta)v} + \int \rho(A_s) dA_s + \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq s}}^M \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\beta N_{max}}{(1 - \beta)v} + \int \rho(A_s) dA_s \right] \left(\frac{r_s}{r_i} \right)^\alpha} \quad (2.11)$$

Note que o valor de F depende da posição (x, y) do usuário, isto é, depende de r_s . Então, o valor médio da eficiência de reuso pode ser obtido através de uma integração na área da célula:

$$F_s = \frac{1}{A_s} \int \int F_s(x, y) dx dy \quad (2.12)$$

2.3 Cálculo da capacidade em sistemas 2G

Nesta seção serão detalhadas as fórmulas de capacidade para sistemas CDMA de segunda geração. Na segunda geração, o cálculo da capacidade tem como objetivo apenas o dimensionamento do número de circuitos que serão alocados para serviços de voz ou dados a uma taxa única possível (9,6 kbps ou 14,4 kbps). Nos sistemas CDMA, a capacidade é determinada pela qualidade de sinal satisfatória para todos os usuários. Para isto, determina-se uma relação sinal-ruído (SNR) mínima para os assinantes ativos. A relação sinal-ruído é definida como [23]:

$$SNR = \frac{E_b}{N_t} = \frac{G_p C}{N_0 W + I} \quad (2.13)$$

onde E_b é a energia de bit, N_t é a energia do ruído total, C é a potência da portadora do sinal recebido, N_0 é a densidade espectral do ruído branco, W é a largura da banda de transmissão, I é a interferência gerada pelos outros elementos do sistema e G_p é o ganho de processamento dado pela razão entre a largura do canal W e a largura espectral do sinal transmitido, ou taxa de transmissão R .

No caso de sistemas de Terceira Geração (3G), ao admitirem serviços multi-taxas, o cálculo é feito de forma diferente, como será apresentado no capítulo 4.

2.3.1 Capacidade do Enlace Reverso

Para o enlace reverso, todo o desenvolvimento será feito sobre o canal de tráfego, considerando um controle de potência perfeito. Para o caso em que o sistema CDMA é composto de apenas uma célula, temos que:

$$I = v \sum_{k=1}^{N-1} C_k \quad (2.14)$$

onde C_k é a potência do sinal enviado pelo usuário k que é recebida pela ERB e v é o fator de atividade. Para um controle de potência perfeito:

$$C_k = C = \frac{P_{max}}{l_o r^\alpha} \quad \forall k \quad (2.15)$$

onde P_{max} é a potência máxima efetivamente radiada pela unidade móvel e r o raio da célula. Substituindo (2.15) e (2.14) em (2.13) e resolvendo para N , temos:

$$N = 1 + \frac{G_p}{v(E_b/N_t)} - \frac{\mathcal{N}_0 W l_o}{v P_{max}} r^\alpha \quad (2.16)$$

que determina a quantidade de usuários para um sistema CDMA com apenas uma célula.

Para o sistema CDMA composto de múltiplas células, a interferência I gerada pelos elementos do sistema é composta pela soma de dois fatores: a interferência gerada na mesma célula I_{sc} e a interferência gerada nas outras células I_{oc} . Para o enlace reverso, considerando (2.15), temos:

$$I_{sc} = (N - 1)vC \quad (2.17)$$

$$I_{oc} = \left(\frac{1}{F} - 1 \right) NvC \quad (2.18)$$

onde F é o fator de eficiência de reuso de frequências. Substituindo (2.17) e (2.18) em (2.13), temos:

$$\frac{E_b}{\mathcal{N}_t} = \frac{G_p C}{\mathcal{N}_0 W + \left(\frac{N}{F} - 1 \right) vC} \quad (2.19)$$

Combinando (2.15) com (2.19) e resolvendo para N temos:

$$N = F \left(1 + \frac{G_p}{v(E_b/N_t)} - \frac{\mathcal{N}_0 W l_o}{v P_{max}} r^\alpha \right) \quad (2.20)$$

Comparando as equações (2.16) e (2.20), notamos a presença do parâmetro F , que está relacionado com a interferência gerada pelas outras células.

A equação (2.20) mostra a expressão para o cálculo da capacidade e sua dependência da eficiência de reuso de frequência. Essa dependência demonstra a propriedade de *soft capacity* [24], definida para sistemas CDMA. Em sistemas de múltiplo acesso por divisão em frequência ou em tempo, a capacidade é determinada pela quantidade de canais alocados para os usuários da célula. Já em sistemas CDMA, não existe um limite fixo de capacidade máxima, visto que este é dado pelo aumento da interferência na célula [16]. Essa propriedade, chamada de *soft capacity*, torna o cálculo da capacidade

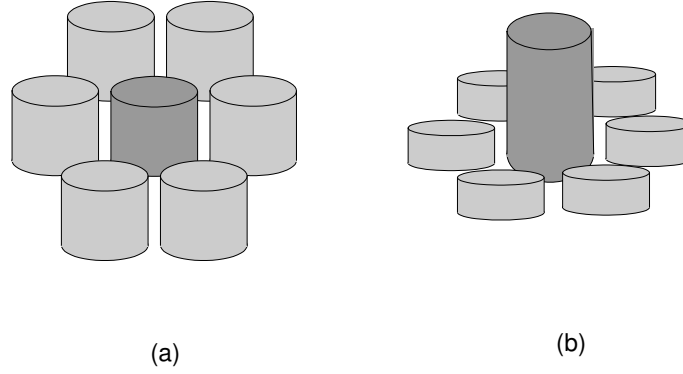


Figura 2.3: Soft capacity para célula central quando as células estão igualmente carregadas (a) e quando há menos interferência nas células vizinhas (b).

para sistemas CDMA mais complexo. A propriedade de *soft capacity*, ilustrada na Figura 2.3, permite uma maior capacidade na célula, caso seja verificado um cenário de menor interferência nas células vizinhas, isto é, para um valor da eficiência de reuso de frequências mais próximo da unidade. A determinação imprecisa do fator F , portanto, pode acarretar na não-admissão de um possível novo usuário ou na admissão de um novo usuário seguida de uma diminuição da qualidade de serviço em toda a célula.

2.3.2 Capacidade do Enlace Direto

Para o cálculo da capacidade do enlace direto, a análise também é feita sobre o canal de tráfego. Porém, deve-se levar em consideração a interferência provocada também pelos canais de *overhead*, isto é, os canais piloto, de *paging* e de sincronismo. Deste modo temos que a potência do sinal para o assinante k será dada por:

$$C_k = C = \frac{(1 - \beta)P_T}{N_{max}l_or^\alpha} \quad \forall k \quad (2.21)$$

onde β é a fração da potência total dedicada a canais de *overhead*.

Para o caso de um sistema CDMA de uma única célula temos que a interferência I é apresentada como:

$$I = v\varepsilon(N - 1)\frac{(1 - \beta)P_T}{N_{max}l_or^\alpha} + \frac{\beta\varepsilon P_T}{l_or^\alpha} \quad (2.22)$$

onde o primeiro termo está relacionado com os canais de tráfego e o segundo com os canais de *overhead*.

De modo análogo ao enlace reverso, usando as equações (2.13), (2.21) e (2.22) temos que a quantidade de usuários N será dada por:

$$N = 1 + \frac{G_p}{v\varepsilon(E_b/\mathcal{N}_t)} - \frac{\beta N_{max}}{(1-\beta)v} - \frac{\mathcal{N}_0 W N_{max} l_o}{v\varepsilon(1-\beta)P_T} r^\alpha \quad (2.23)$$

Para o sistema CDMA composto de múltiplas células temos da mesma forma os fatores I_{sc} e I_{oc} onde:

$$I_{sc} = (N-1)v\varepsilon C + \frac{\beta\varepsilon P_T}{l_o r^\alpha} \quad (2.24)$$

$$I_{oc} = \left(\frac{1}{F} - 1\right) \left(NvC + \frac{\beta P_T}{l_o r^\alpha}\right) \quad (2.25)$$

Substituindo (2.24) e (2.25) em (2.13), temos:

$$\frac{E_b}{\mathcal{N}_t} = \frac{G_p C}{\mathcal{N}_0 W + \left(\frac{1}{F} - (1-\varepsilon)\right) \left(NvC + \frac{\beta P_T}{l_o r^\alpha}\right) - \frac{v\varepsilon C}{F}} \quad (2.26)$$

Combinando (2.21) com (2.26) e resolvendo para N temos:

$$N = \frac{F}{1-F(1-\varepsilon)} \left[\varepsilon + \frac{G_p}{v(E_b/\mathcal{N}_t)} - \frac{\mathcal{N}_0 W N_{max} l_o}{v P_T (1-\beta)} r^\alpha \right] - \frac{\beta N_{max}}{(1-\beta)v} \quad (2.27)$$

Para esse caso, o valor de F utilizado para o cálculo da capacidade é o valor médio determinado pela equação (2.12).

2.4 Considerações sobre o cálculo da capacidade em Sistemas 2G

Para sistemas de Segunda Geração são utilizadas as fórmulas para cálculo da capacidade apresentados na seção anterior. A fórmula normalmente utilizada para estes sistemas é aquela para o enlace reverso com múltiplas células, isto é equação (2.20). Isto acontecia porque acreditava-se que o enlace reverso era o limitante [25], visto que este opera de modo assíncrono e vários usuários, ao acessarem a ERB, constituem fontes múltiplas

de interferência. O enlace direto, ao contrário, opera de modo síncrono e possui um número menor de interferentes. Essas considerações se mostraram incorretas e, na prática, o enlace direto mostra-se como enlace limitante, principalmente devido aos seguintes fatores [21]:

- A interferência no enlace reverso é provocada por um grande número de transmissores de baixa potência (unidades móveis), o que tende a ser estatisticamente estável segundo a lei dos grandes números. A interferência no enlace direto, por sua vez, tem origem em um número pequeno de transmissores de potências altas, o que torna crítica a situação nas bordas das células, onde bases servidoras e interferentes possuem caminho de propagação equivalentes;
- O uso de *soft handoff*, afim de reduzir a interferência nas bordas, necessita do uso de canais de tráfego adicionais no enlace direto;
- A utilização de um controle de potência rápido e preciso no enlace reverso propiciou um aumento da capacidade do enlace reverso, diferentemente do enlace direto onde o controle de potência é lento.

2.5 Conclusões

Neste capítulo apresentamos uma análise sobre a eficiência de reuso de frequências, bem como sua importância para o cálculo da capacidade. Foi demonstrado como é feito o cálculo desse fator para os enlaces reverso e direto. Para o enlace reverso, temos um único valor da eficiência de reuso de frequências para a célula, ao contrário do enlace direto, onde o valor depende da posição na célula. Vimos que os valores de F podem variar bastante, dependendo do ambiente de propagação considerado. Portanto, ao admitir um valor fixo para F , pode-se estar estabelecendo uma capacidade errônea para o sistema, onde mais usuários poderiam ser aceitos ou a quantidade de usuários poderia estar além de um limiar que assegure uma relação sinal-ruído mínima a todos os assinantes.

Foi mostrado também nesse capítulo como é feito o cálculo da capacidade para os sistemas 2G, onde a eficiência de reuso de frequência se mostra como um fator

necessário em sistemas composto de múltiplas células. Foram mostradas as fórmulas para o cálculo da capacidade nos enlaces reverso e direto, onde a principal diferença está na presença de canais de *overhead* e do fator de ortogonalização. Ao apresentar a fórmula, observamos que, ao admitir um valor fixo para F , pode-se estar estabelecendo uma capacidade errada para o sistema, onde mais usuários poderiam ser aceitos ou a quantidade de usuários poderia estar além de um limiar que assegure uma relação sinal-ruído mínima a todos os assinantes.

Ao final foram feitas algumas considerações a respeito do cálculo da capacidade, onde foi mostrado que o enlace direto é o enlace limitante.

Capítulo 3

Eficiência de Reuso de Frequências em Sistemas com Serviços Multi-taxas

Como visto no Capítulo 2, o enlace direto merece uma importância maior para uma análise da capacidade do sistema CDMA, devido às razões listadas na seção 2.4, as quais o torna o enlace limitante. Com o surgimento de novos serviços, definidos para os sistemas de Terceira Geração (3G), a análise sobre o enlace direto torna-se ainda mais necessária, visto que estes serviços demandam taxas de transmissão maiores no sentido ERB-unidade móvel em comparação com o sentido inverso.

Conseqüentemente, a análise da eficiência de reuso de frequências para sistemas de terceira geração deve ser feita para o enlace direto, em um cenário composto de vários tipos de usuários caracterizados por taxas de transmissão e requisitos de qualidade de serviço distintos.

3.1 Interferência no enlace direto

A interferência no enlace direto é caracterizada pela presença de um fator de ortogonalidade determinado pelo ambiente de multi-percurso. Esse fator indica quanto o ambiente de propagação atua na propriedade de correlação cruzada dos códigos utilizados no enlace direto [26]. Assim, a interferência gerada na mesma célula I_{sc} do usuário k é

toda a potência originada em sua estação rádio-base servidora s que chega na unidade móvel, menos a fração da potência total δ_k referente ao usuário k , ponderada pelo fator de ortogonalidade:

$$I_{sc} = \varepsilon_k(1 - \delta_k) \frac{P_T^{(s)}}{l_o r_{ks}^\alpha} \quad (3.1)$$

onde r_{ks} é a distância entre o usuário k e a estação servidora s . Observe que para uma ortogonalização perfeita, isto é, para $\varepsilon_k = 0$, temos interferência nula.

Da mesma forma, a potência total P_{sc} recebida pelo usuário k que é originada na célula servidora s é a soma da interferência gerada na mesma célula I_{sc} e a potência destinada ao usuário k :

$$P_{sc} = \varepsilon_k(1 - \delta_k) \frac{P_T^{(s)}}{l_o r_{ks}^\alpha} + \delta_k \frac{P_T^{(s)}}{l_o r_{ks}^\alpha} \quad (3.2)$$

A interferência gerada pelas outras células I_{oc} será dada pelo somatório das potências recebidas pelo usuário k que são originadas das outras células do sistema:

$$I_{oc} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq s}}^M \frac{P_T^{(i)}}{l_o r_{ki}^\alpha} \quad (3.3)$$

onde r_{ki} é a distância entre o usuário k e a estação interferente i .

Para o atendimento aos requisitos de qualidade de serviço, o k -ésimo usuário deve possuir uma relação sinal-interferência $(E_b/I_t)_k$ mínima. A expressão para $(E_b/I_t)_k$ é similar a (2.13), se diferenciando apenas pelo ruído branco, por ter valor desprezível em relação às interferências inerentes ao sistema CDMA, isto é, às interferências geradas pelos usuários. Esta expressão é dada por:

$$\left(\frac{E_b}{I_t} \right)_k = \frac{(W/R_k)\delta_k \left(P_T^{(s)}/l_o r_{ks}^\alpha \right)}{I_{oc} + I_{sc}} \quad (3.4)$$

onde W é largura de banda de transmissão, R_k é a taxa de transmissão do usuário k .

Manipulando as equações (3.1), (3.3) e (3.4), temos que:

$$\delta_k = \frac{L_k + \varepsilon_k}{\chi_k + \varepsilon_k} \quad (3.5)$$

α	$\overline{L_k}$	$L_{k \max}$
2	1,551	4,284
3	0,549	2,542
4	0,291	2,073

Tabela 3.1: Valores de $\overline{L_k}$ e $L_{k \max}$ para diferentes ambientes de propagação.

onde L_k é um parâmetro dependente da posição do usuário dado por:

$$L_k = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq s}}^M \frac{P_T^{(i)}}{P_T^{(s)}} \left(\frac{r_{ks}}{r_{ki}} \right)^\alpha \quad (3.6)$$

e o parâmetro χ_k , conhecido como *jamming margin* [25], é definido como a razão entre o ganho de processamento e a relação sinal- interferência, isto é,

$$\chi_k = \frac{W/R_k}{(E_b/I_t)_k} \quad (3.7)$$

Ao analisar as equações (3.7) e (3.5) notamos que altas taxas de transmissão demandam uma fração maior da potência total do enlace direto. Observamos também que, dependendo da alocação de potência dos outros usuários e de suas posições na célula, um novo usuário pode não ter acesso a todos os serviços, visto que este pode demandar uma fração alta da potência total.

Observa-se na equação (3.6) que o parâmetro L_k depende exclusivamente de como a rede é planejada (topologia da rede), da potência total emitida pelas ERBs e do ambiente de propagação. Considerando uma célula central de uma rede de 4 anéis com todas as ERBs com a mesma potência total emitida no enlace direto, isto é, $P_T^{(i)} = P_T^{(s)} \forall i$, gera-se a Figura 3.1 para diferentes ambientes de propagação ($\alpha = 2, 3$ e 4). Ela mostra os valores normalizados de L_k , isto é $L_k/L_{k \max}$, onde $L_{k \max}$ denota o valor máximo de L_k na célula, em função da distância normalizada (r_{ks}/R_{cell} , onde r_{ks} representa a distância do usuário em relação à ERB e R_{cell} , o raio da célula). Os valores médios $\overline{L_k}$ para L_k e os valores $L_{k \max}$ para este cenário são mostrados na Tabela 3.1.

Analisando a Figura 3.1 e a Tabela 3.1, observa-se que o parâmetro L_k aumenta à medida que aumenta a distância da estação rádio-base servidora e que, quanto maior

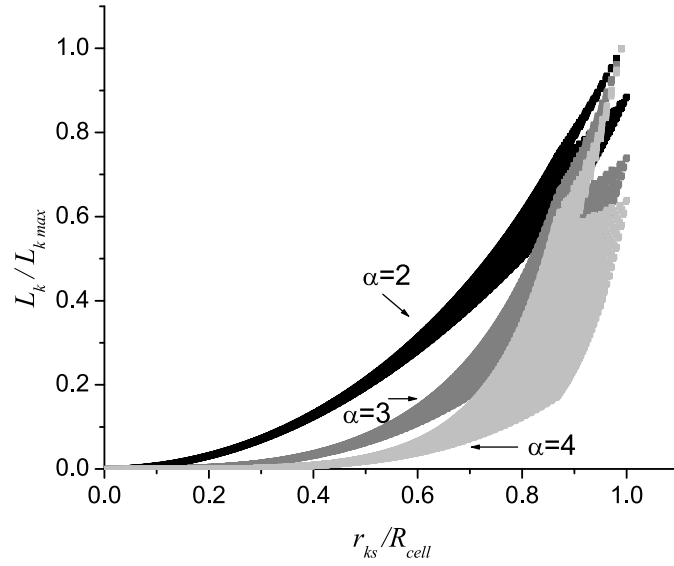


Figura 3.1: Parâmetro L_k normalizado em função da distância normalizada da estação rádio-base.

o valor de α , maiores são os valores e a taxa de crescimento de L_k . Nota-se também que, para um valor maior de α , maior é a variância dos valores de L_k a uma mesma distância da ERB.

A Figura 3.2 mostra os valores de $\overline{L_k}$ e os valores de $L_{k,max}$, sendo este último mostrado entre parênteses, para cada célula numa rede de quatro anéis, com $\alpha = 4$. Nota-se que os valores de L_k decrescem na direção das células da borda do sistema (4º anel), visto que a interferência nas células da periferia é bem menor que a interferência das células mais ao centro.

A variação do parâmetro L_k é melhor ilustrada nas Figuras 3.3 e 3.4, onde são mostrados faixas de valores para $L_k / L_{k,max}$ ao longo da célula central e da célula do quarto anel destacada na Figura 3.2, para a mesma rede de 4 anéis e $\alpha = 4$. Observa-se que a célula do quarto anel sofre bem menos interferência que a célula central, que recebe interferência de mais células em todas direções.

As Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 mostram, para a célula central de uma rede de 4 anéis e $\alpha = 2, 3$ e 4 respectivamente, a variação de L_k ao longo da célula. Os valores da razão

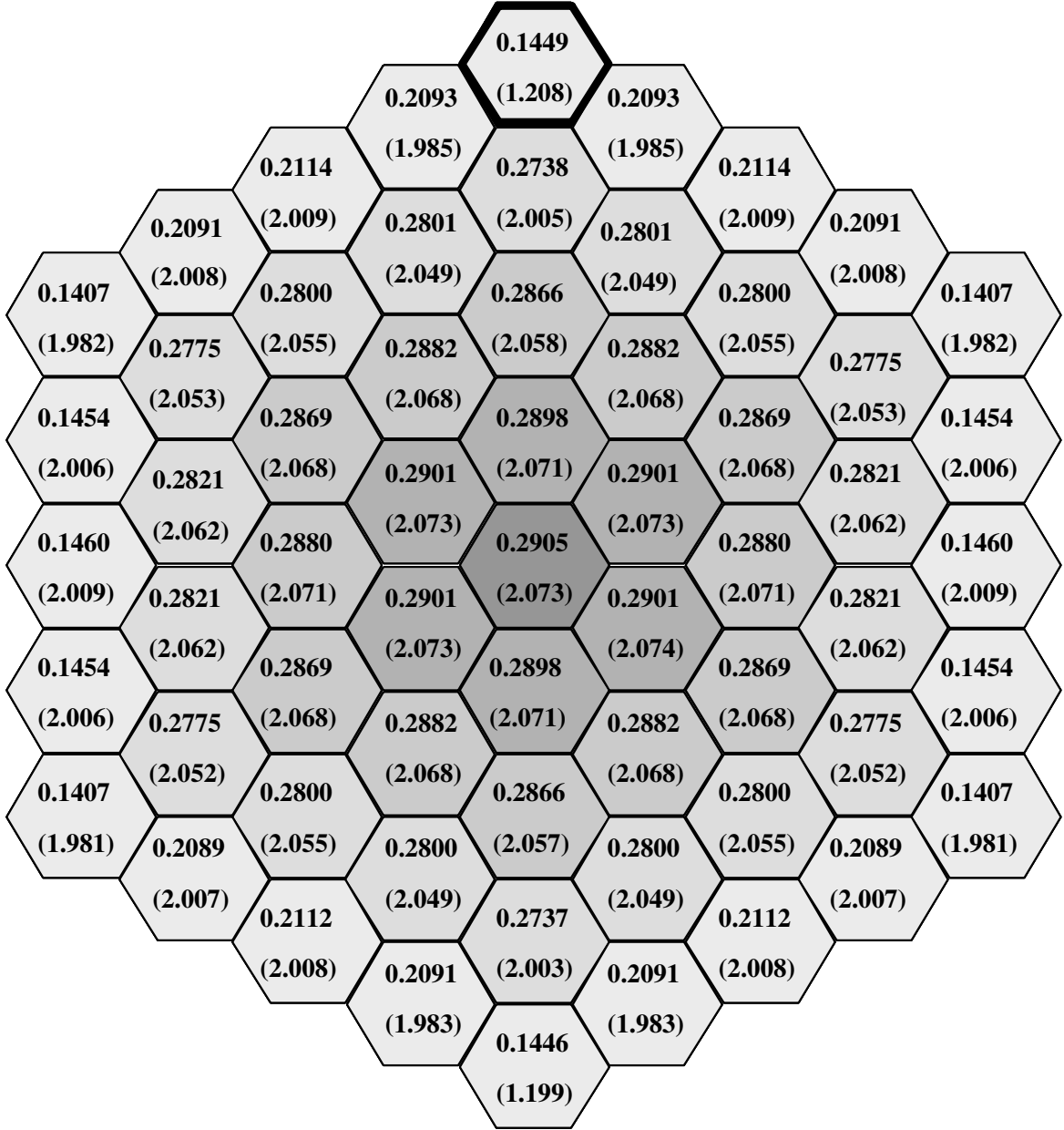


Figura 3.2: Valores de $\overline{L}_k$ e valores de $L_{k \max}$ (em parênteses) para uma rede de 4 anéis e $\alpha = 4$.

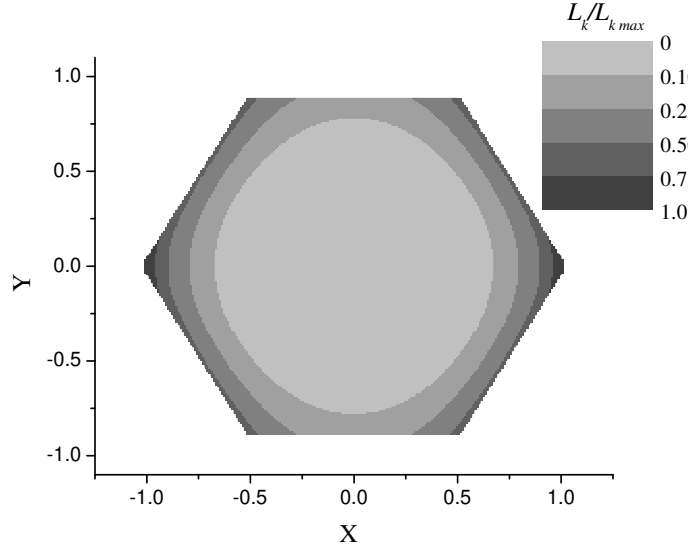


Figura 3.3: Variação de $L_k/L_{k \max}$ para a célula central de uma rede de 4 anéis, $\alpha = 4$ e ERB situada em $(X, Y) = (0, 0)$.

$L_k/L_{k \max}$ agora são mostrados no eixo Z, com a célula situada no plano XY.

É mostrada também, na Figura 3.8, a variação para a célula do quarto anel. As figuras também mostram uma projeção dos valores de $L_k/L_{k \max}$ no plano XY. Assim a projeção no plano XY para as Figuras 3.7 e 3.8 são iguais às Figuras 3.3 e 3.4, respectivamente. Observa-se nas Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 que a variação de L_k ao longo da célula é bem mais acentuada para ambientes de propagação de expoentes menores. Isso ocorre devido ao fato de que, quanto menor for decaimento da potência emitida pela ERB, maior será a interferência gerada por ela nas outras células.

A Figura 3.9 mostra os valores médios $\overline{L_k}$ para o parâmetro L_k ao longo da célula, bem como os desvios-padrões. Esses valores foram calculados a cada $0,05R_{cell}$ da célula central de uma rede de 4 anéis e $\alpha = 4$. Esse gráfico será importante para determinação da capacidade nos exemplos do capítulo 4.

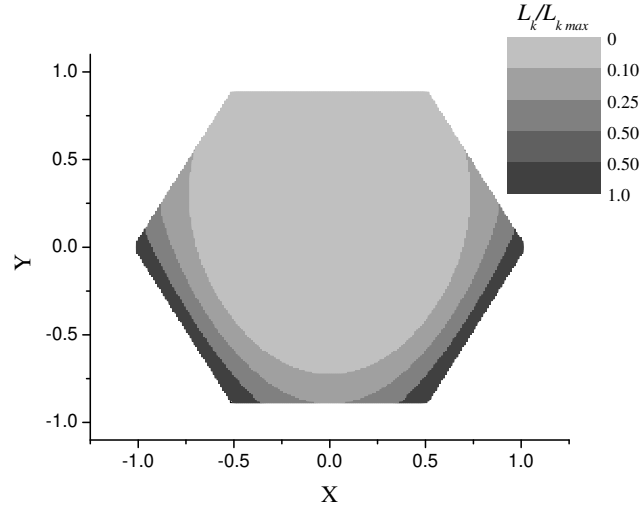


Figura 3.4: Variação de $L_k/L_{k \max}$ para a célula do quarto anel de uma rede de 4 anéis, $\alpha = 4$ e ERB situada em $(X, Y) = (0, 0)$.

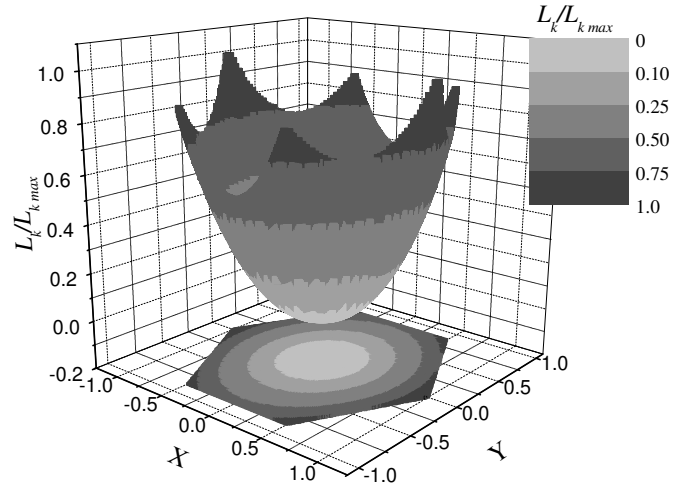


Figura 3.5: Variação de $L_k/L_{k \max}$ (eixo Z) para a célula central de uma rede de 4 anéis, $\alpha = 2$ e ERB situada em $(X, Y) = (0, 0)$.

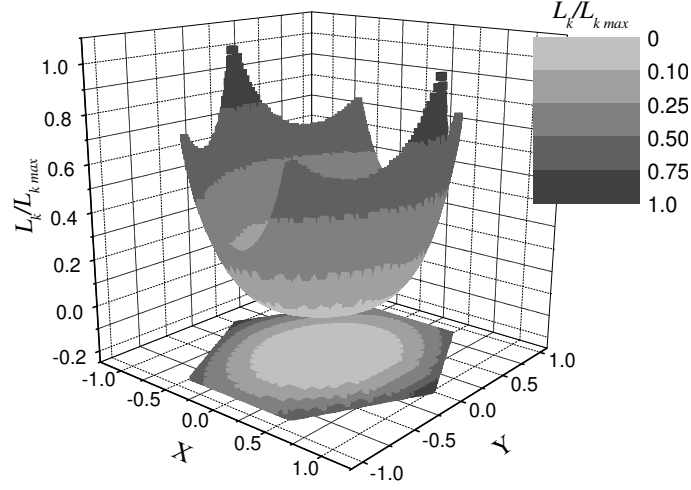


Figura 3.6: Variação de $L_k/L_{k \max}$ (eixo Z) para a célula central de uma rede de 4 anéis, $\alpha = 3$ e ERB situada em $(X, Y) = (0, 0)$.

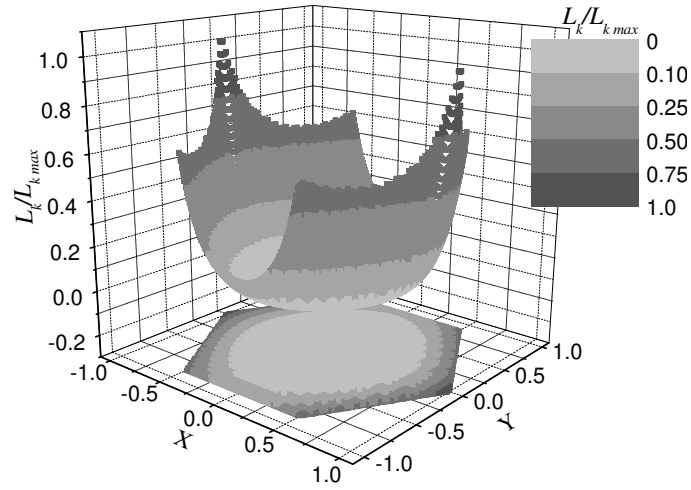


Figura 3.7: Variação de $L_k/L_{k \max}$ (eixo Z) para a célula central de uma rede de 4 anéis, $\alpha = 4$ e ERB situada em $(X, Y) = (0, 0)$.

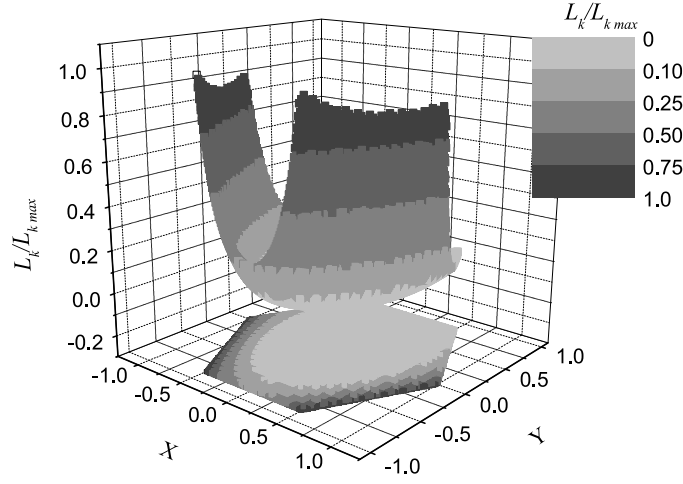


Figura 3.8: Variação de $L_k/L_{k,max}$ (eixo Z) para a célula do quarto anel de uma rede de 4 anéis, $\alpha = 4$ e ERB situada em $(X, Y) = (0, 0)$.

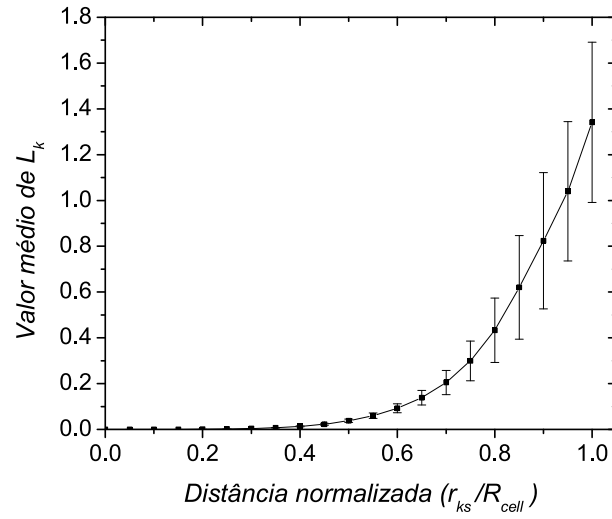


Figura 3.9: Variação de $\overline{L_k}$ e desvio-padrão com relação à distância da ERB, para a célula central de uma rede de 4 anéis, $\alpha = 4$.

3.2 Eficiência de reuso de frequências

Usando as equações (2.1), (3.2) e (3.3), e considerando que todas as estações rádio-base possuem a mesma potência total para o enlace direto, isto é $P_T^{(i)} = P_T^{(s)} \forall i$, obtemos uma expressão para a eficiência de reuso de frequências:

$$F_k = \frac{\delta_k(1 - \varepsilon_k) + \varepsilon_k}{\delta_k(1 - \varepsilon_k) + \varepsilon_k + L_k} \quad (3.8)$$

O parâmetro F é aqui escrito como F_k , visto que, no enlace direto, F depende da posição do usuário k . Combinando as equações (3.5) e (3.8), temos que a eficiência de reuso de frequências pode ser escrita como:

$$F_k = \frac{\varepsilon_k(1 + \chi_k) + L_k(1 - \varepsilon_k)}{(1 + \chi_k)(\varepsilon_k + L_k)} \quad (3.9)$$

A equação (3.9) mostra a expressão para cálculo do valor de F_k necessário para uma determinado serviço, caracterizado por χ_k , já que esta equação é obtida utilizando a expressão (3.5), cujo resultado é o valor de δ_k necessário para o atendimento do serviço requisitado. A Figura 3.10 mostra variação de F_k com relação a χ_k para $\varepsilon_k = 0,5$ e para vários valores de $L_k/L_{k \max}$ calculados para uma rede de 4 anéis e $\alpha = 2$. O mesmo cenário é utilizado nas Figuras 3.11 e 3.12, tendo $\alpha = 3$ e $\alpha = 4$ respectivamente, como expoentes de propagação.

Observa-se nas Figuras 3.10, 3.11 e 3.12 que a eficiência de reuso de frequências varia rapidamente em relação ao parâmetro *jamming margin* para valores pequenos deste parâmetro, isto é, para altas taxas de transmissão e/ou altos requisitos de E_b/I_t . De fato, quando um assinante é atendido a um pedido de transmissão em altas taxas, uma degradação brusca na capacidade e na cobertura do sistema deve ser percebida. Já para pequenos valores de *jamming margin*, ou baixos requisitos de E_b/I_t e/ou taxas de transmissão, a eficiência de reuso de frequências sofre quase nenhuma variação em relação ao parâmetro *jamming margin*.

A Figura 3.13 mostra o gráfico de F_k em função de χ_k para $\alpha = 4$ e $\varepsilon_k = 0$, isto é, a interferência gerada na mesma célula é nula. Para este caso, temos que a equação (3.9) reduz-se a:

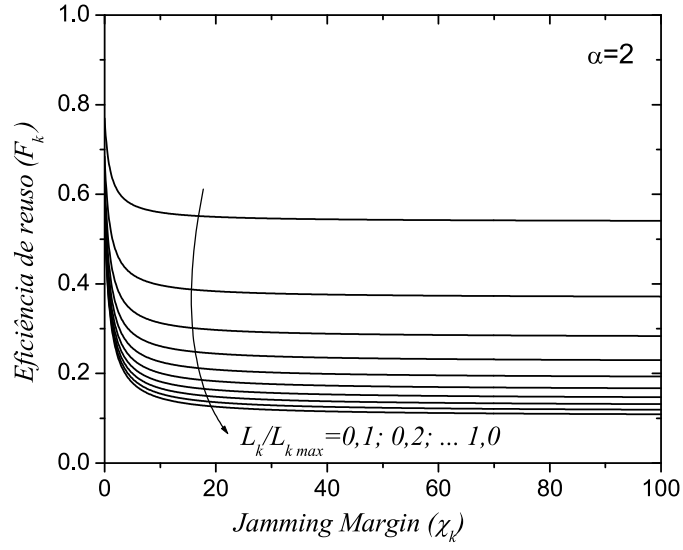


Figura 3.10: Gráfico de F_k por χ_k para $\varepsilon_k = 0,5$, $\alpha = 2$ e diferentes valores de L_k normalizado.

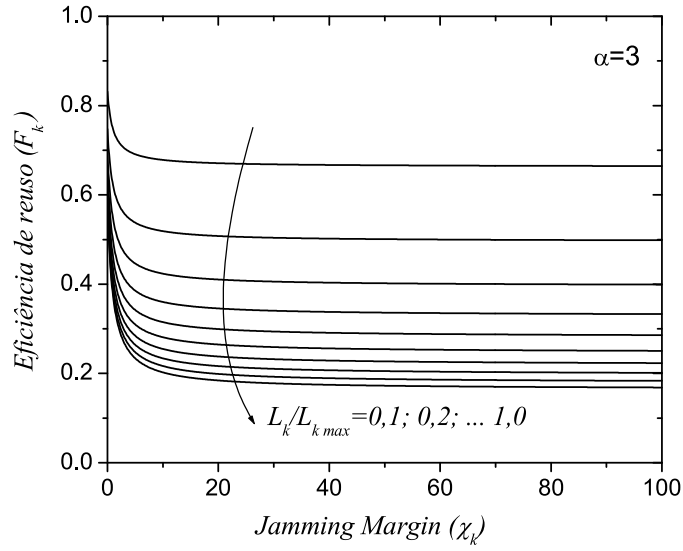


Figura 3.11: Gráfico de F_k por χ_k para $\varepsilon_k = 0,5$, $\alpha = 3$ e diferentes valores de L_k normalizado.

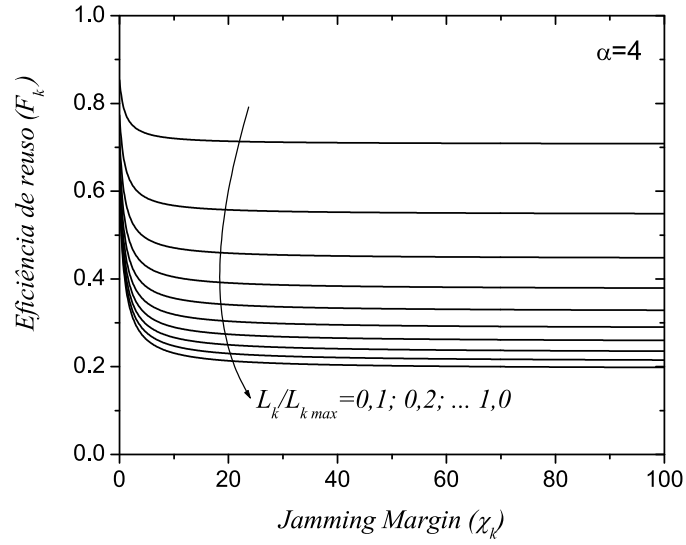


Figura 3.12: Gráfico de F_k por χ_k para $\varepsilon_k = 0,5$, $\alpha = 4$ e diferentes valores de L_k normalizado.

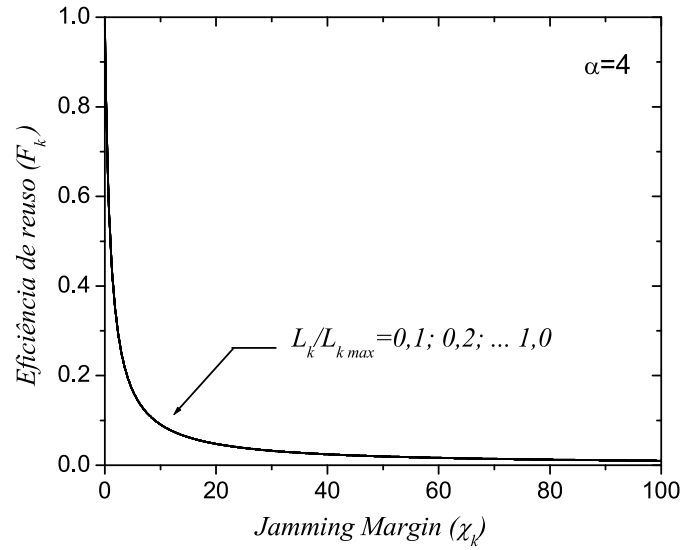


Figura 3.13: Gráfico de F_k por χ_k para $\varepsilon_k = 0$, $\alpha = 4$.

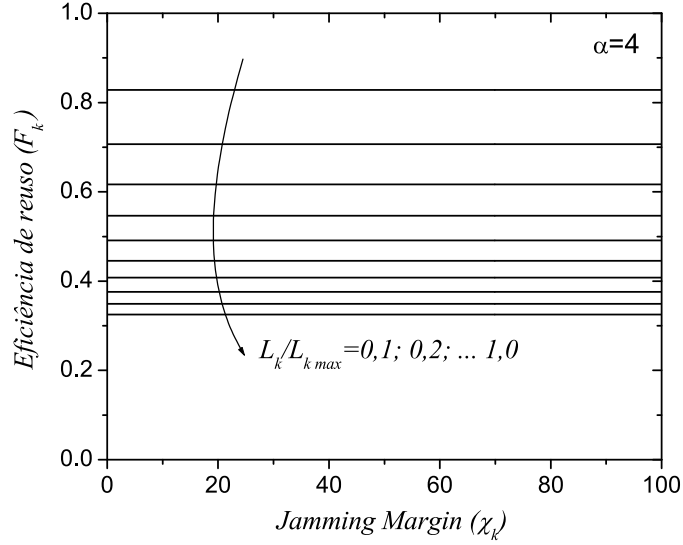


Figura 3.14: Gráfico de F_k por χ_k para $\varepsilon_k = 1$, $\alpha = 4$.

$$F_k = \frac{1}{1 + \chi_k} \quad (3.10)$$

Assim, o valor da eficiência de reuso de frequências necessário para atender ao serviço χ_k independe do parâmetro L_k . Isso ocorre porque, como a interferência I_{sc} é nula, a potência P_{sc} consiste apenas da potência do usuário. A fração da potência total δ_k , para $\varepsilon_k = 0$, será igual a L_k/χ_k , isto é, a potência necessária para o usuário k deve atender os requisitos do seu serviço (χ_k) e sobrepor a interferência gerada pelas outras células (L_k). Como a eficiência de reuso de frequências (equação (2.1)) só dependerá de L_k (relacionado a I_{oc}) e δ_k (relacionado a P_{sc}), e δ_k já leva em conta L_k no seu cálculo, tem-se que F_k dependerá apenas de χ_k , como visto na Figura 3.13.

Analisando agora o caso em que $\varepsilon_k = 1$, temos que a equação (3.9), torna-se:

$$F_k = \frac{1}{1 + L_k} \quad (3.11)$$

Neste caso, não há ortogonalidade entre os códigos e a interferência gerada na mesma célula é máxima. Assim, para atender ao serviço determinado por χ_k , a ERB

deve entregar uma fração δ_k da potência total ao usuário k , e todo o restante $(1-\delta_k)$ será interferência. Portanto, a potência total P_{sc} recebida pelo usuário k que é originada na célula servidora s é sempre igual a $P_T^{(s)}$ multiplicada pela perda de percurso $(1/l_or_{ks}^\alpha)$, independente do tipo de serviço solicitado. Como esses dois fatores (potência total da ERB e perda de percurso) já estão relacionados no parâmetro L_k , juntamente com a interferência gerada pelas outras células do sistema, a eficiência de reuso de frequências será dependente apenas de L_k , como mostrado na equação (3.11) e na Figura 3.14.

3.3 Conclusões

Neste capítulo foi feita uma análise da interferência em sistemas CDMA multi-taxas para o enlace direto. Vimos que esta dependerá da posição do móvel na célula, do ambiente de propagação e da topologia da rede. Definimos o parâmetro L_k que agrega todos esses fatores e relaciona as interferências geradas fora da célula servidora e aquela originada dentro da célula servidora. A partir daí chegamos na expressão para a fração da potência total da ERB que é necessária para atender um determinado serviço. Observamos que esta fração aumenta para taxas maiores de transmissão e maiores requisitos de relação sinal-interferência, o que pode excluir alguns serviços, dependendo da sua posição e do tráfego na célula.

Mostrou-se também a variação do parâmetro L_k ao longo da célula para diferentes ambientes de propagação, onde observou-se que para um expoente de perda de percurso menor, o valor deste parâmetro cresce a uma taxa mais alta à medida que se distancia da estação rádio-base. Vimos também que o valor médio deste parâmetro diminui à proporção que se caminha para os anéis mais externos da rede de células, visto que estes sofrem menos interferência que aqueles mais internos. Esse fato é comprovado quando comparamos o comportamento do parâmetro L_k ao longo de uma célula do quarto anel com o de uma célula central.

Deduzimos então a expressão para a eficiência de reuso de frequências, onde observou-se que o valor de F necessário para o atendimento satisfatório do usuário, varia rapidamente para taxas de transmissão mais altas ou requisitos de qualidade de serviço mais restritivos, isto é, níveis necessários de SIR altos. Já para taxas menores e baixos

limiares de relação sinal-interferência, quase não ocorre variações para a eficiência de reuso de frequências.

Capítulo 4

Cálculo da Capacidade em Sistemas com Serviços Multi-taxas

A eficiência de reuso de frequências é um parâmetro utilizado no cálculo da capacidade que está relacionado com a degradação do sistema devido à interferência gerada pelos usuários do sistema CDMA. O cálculo da capacidade para sistemas 2G, bem como a importância do parâmetro F neste cálculo, foram mostrados no Capítulo 2. Entretanto, a abordagem utilizada neste cálculo, feita para sistemas constituídos apenas do serviço de voz, não mais se aplica para os sistemas de multi-taxas.

Neste capítulo, será mostrada uma nova forma de cálculo da capacidade demonstrado em [5], que é a fórmula mais utilizada atualmente. A partir da análise do Capítulo 2 será desenvolvida uma nova fórmula de capacidade. Ao final serão mostradas algumas aplicações utilizando essa nova fórmula.

4.1 Cálculo da capacidade através da fórmula de capacidade de pólo

A fórmula de capacidade de pólo apresentada em [5] para o enlace direto foi deduzida em [15] e apresenta o cálculo da capacidade através de um fator de carga. A dedução

foi feita à partir da seguinte fórmula para a relação sinal-ruído E_b/N_t :

$$\left(\frac{E_b}{N_t}\right)_k = \left(\frac{W}{R_k}\right) \frac{\delta_k P / \lambda_{ks}}{\frac{\varepsilon_k P}{\lambda_{ks}} + P \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq s}}^M \frac{1}{\lambda_{ki}} + \mathcal{N}_0 W} \quad (4.1)$$

onde W é a largura da banda de transmissão, R_k é a taxa de transmissão do usuário k , δ_k é a fração da potência de transmissão da estação rádio-base servidora s requerida pelo usuário k , λ_{ks} é a perda de percurso entre a estação s e o usuário k , ε_k é o fator de ortogonalidade, λ_{ki} é a perda de percurso entre a estação interferente i e o usuário k , M é o número de células no sistema, P é a potência total de transmissão de cada estação rádio-base, e $\mathcal{N}_0$ é a densidade espectral do ruído térmico (ruído branco).

Resolvendo a equação (4.1) para $\delta_k P$, tem-se:

$$\delta_k P = \frac{(E_b/N_t)_k}{W/R_k} \left(\varepsilon_k P + P \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq s}}^M \frac{\lambda_{ks}}{\lambda_{ki}} + \mathcal{N}_0 W \lambda_{ks} \right) \quad (4.2)$$

A equação (4.2) é multiplicada pelo fator de atividade v_k e é feito o somatório para todos os N usuários ativos presentes na estação servidora s , o que resulta em:

$$\begin{aligned} P &= \sum_{k=1}^N v_k \delta_k P \\ &= P \sum_{k=1}^N \left[\left(\frac{E_b}{N_t}\right)_k \frac{v_k R_k}{W} \left(\varepsilon_k + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq s}}^M \frac{\lambda_{ks}}{\lambda_{ki}} \right) \right] + \mathcal{N}_0 \sum_{k=1}^N \left(\frac{E_b}{N_t}\right)_k v_k R_k \lambda_{ks} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Resolvendo a equação (4.3) para P :

$$P = \frac{\mathcal{N}_0 \sum_{k=1}^N \left(\frac{E_b}{N_t}\right)_k v_k R_k \lambda_{ks}}{1 - \sum_{k=1}^N \left[\left(\frac{E_b}{N_t}\right)_k \frac{v_k R_k}{W} \left(\varepsilon_k + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq s}}^M \frac{\lambda_{ks}}{\lambda_{ki}} \right) \right]} \quad (4.4)$$

Define-se então, o fator de carga como:

$$\rho = \sum_{k=1}^N \left[\frac{(E_b/N_t)_k v_k R_k}{W} (\varepsilon_k + I_k) \right] \quad (4.5)$$

onde:

$$I_k = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq s}}^M \frac{\lambda_{ks}}{\lambda_{ki}} \quad (4.6)$$

Fazendo:

$$P_N = \mathcal{N}_0 \sum_{k=1}^N \left(\frac{E_b}{N_t} \right)_k v_k R_k \lambda_{ks} \quad (4.7)$$

temos:

$$P = \frac{P_N}{1 - \rho} \quad (4.8)$$

A equação (4.8) mostra que a potência total no enlace direto é composta de dois termos. O primeiro termo (P_N) é igual a potência que seria necessária na ausência de interferência, isto é, a potência necessária para superar o ruído térmico. O segundo termo está relacionado com o crescimento devido à interferência originada pelo múltiplo acesso que é inversamente proporcional a $1 - \rho$.

Observa-se que, quando ρ aproxima-se de 1, a capacidade do enlace direto aproxima-se do seu máximo, a chamada capacidade de pólo, onde a potência total de transmissão tende a infinito.

4.2 Considerações sobre a fórmula da capacidade de pólo

A fórmula da capacidade de pólo, representada pela equação (4.5), é utilizada como fórmula padrão para cálculo da capacidade em sistemas de Terceira Geração. Entretanto, essa fórmula possui algumas limitações decorrentes de suas considerações iniciais, dentre elas destacam-se:

- todas as estações rádio-base apresentam a mesma potência de transmissão, o que pode ser uma consideração relevante, principalmente quando trata-se de sistemas

onde a densidade de tráfego varia consideravelmente ao longo de toda a rede de células, e

- a potência total de transmissão da estação rádio-base é considerada como interferência gerada na mesma célula, o que pode não ser verdade, especialmente no caso em que o sistema define serviços a altas taxas de transmissão. Estes serviços demandam altas potências de transmissão no enlace direto, como já mostrado na equação (3.5), o que indica, neste caso, que boa parte da potência total de transmissão da estação rádio-base não é interferência e sinal útil.

A fim de evitar estas duas limitações, derivou-se uma nova fórmula da capacidade de pólo, utilizando a fórmula de I_{sc} mostrada na equação (3.1). A fórmula para a relação sinal-ruído torna-se:

$$\left(\frac{E_b}{N_t}\right)_k = \left(\frac{W}{R_k}\right) \frac{\delta_k P_T^{(s)} / \lambda_{ks}}{\varepsilon_k (1 - \delta_k) \frac{P_T^{(s)}}{\lambda_{ks}} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq s}}^M \frac{P_T^{(i)}}{\lambda_{ki}} + \mathcal{N}_0 W} \quad (4.9)$$

onde δ_k é a fração da potência total de transmissão $P_T^{(s)}$ da estação servidora s destinada ao usuário k e $P_T^{(i)}$ é a potência total da estação interferente i .

Realizando o mesmo procedimento utilizado para obtenção da equação (4.4), obtém-se a seguinte expressão para a potência $P_T^{(s)}$:

$$P_T^{(s)} = \frac{\mathcal{N}_0 W \sum_{k=1}^N \frac{(E_b/N_t)_k v_k R_k}{(E_b/N_t)_k \varepsilon_k R_k + W} \lambda_{ks}}{1 - \sum_{k=1}^N \left[\frac{(E_b/N_t)_k v_k R_k}{(E_b/N_t)_k \varepsilon_k R_k + W} \left(\varepsilon_k + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq s}}^M \frac{P_T^{(i)}}{P_T^{(s)}} \left(\frac{\lambda_{ks}}{\lambda_{ki}} \right) \right) \right]} \quad (4.10)$$

Considerando as perdas de percurso como apenas decaimentos exponenciais, ou seja,

$$\begin{aligned} \lambda_{ks} &= l_o r_{ks}^\alpha \\ \lambda_{ki} &= l_o r_{ki}^\alpha \end{aligned} \quad (4.11)$$

e utilizando a definição de *jamming margin* χ_k dada na equação (3.7), temos que a equação (4.10) fica:

$$P_T^{(s)} = \frac{\mathcal{N}_0 W \sum_{k=1}^N \frac{v_k}{\varepsilon_k + \chi_k} l_o r_{ks}^\alpha}{1 - \sum_{k=1}^N \left[\frac{v_k}{\varepsilon_k + \chi_k} \left(\varepsilon_k + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq s}}^M \frac{P_T^{(i)}}{P_T^{(s)}} \left(\frac{r_{ki}}{r_{ks}} \right)^\alpha \right) \right]} \quad (4.12)$$

Combinando a equação (4.12) com a equação (3.6), tem-se que expressão para o fator de carga é:

$$\rho = \sum_{k=1}^N \left[\frac{v_k}{\varepsilon_k + \chi_k} (\varepsilon_k + L_k) \right] \quad (4.13)$$

A contribuição ao fator de carga ρ_k para o usuário k será então dada por:

$$\rho_k = \frac{v_k}{\varepsilon_k + \chi_k} (\varepsilon_k + L_k) \quad (4.14)$$

Ao comparar as equações (4.5) e (4.13), nota-se a adição do fator de ortogonalidade ε_k ao parâmetro χ_k no denominador. Isso não deve causar diferenças relevantes no cálculo da capacidade para serviços de taxas de transmissão baixas, visto que os serviços de taxas baixas possuem valores de χ_k bem maiores que os valores de ε_k . Já para serviços caracterizados por altas taxas de transmissão e/ou altos requisitos de relação sinal-ruído, onde os valores de χ_k podem chegar a ordem de ε_k , essa diferença pode indicar a não-admissão de um novo usuário onde há capacidade disponível.

Essa comparação é melhor ilustrada na Figura 4.1, onde é mostrado o gráfico da contribuição no fator de carga ρ_k em função dos valores de L_k , através da equação (4.14), e de I_k , através da equação (4.5), para todas as células da rede com a mesma potência, isto é, $P_T^{(i)} = P_T^{(s)} \forall i$. Note que, a nova definição da interferência gerada na célula servidora I_{sc} , utilizada na dedução da fórmula (4.13), gera desvios em relação à equação (4.5), mas é uma definição mais precisa, que considera a potência alocada para o serviço do usuário k .

Outra modificação é observada na substituição do parâmetro I_k pelo L_k . Isso possibilita uma abordagem mais realista do cálculo da capacidade, onde um cenário composto de células com diferentes distribuições de tráfego e, portanto, diferentes potências

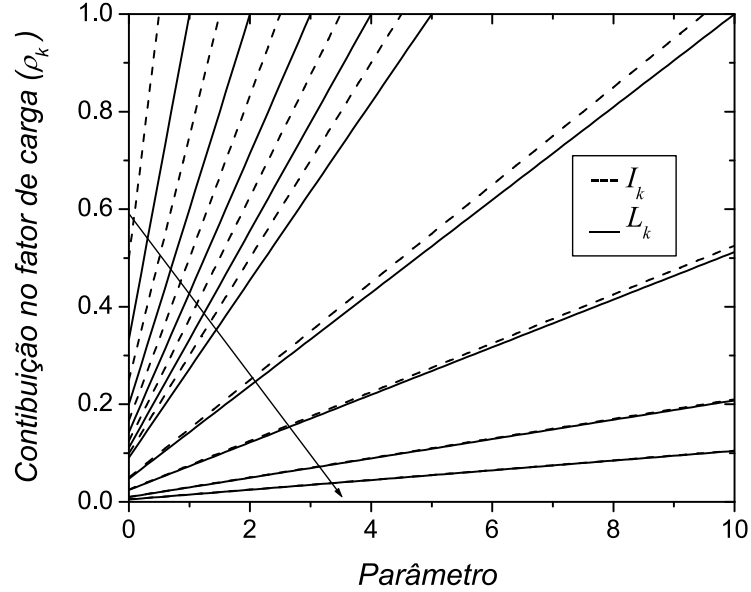


Figura 4.1: Gráfico do fator de carga em função de I_k (linha tracejada) e L_k (linha sólida) para $P_T^{(i)} = P_T^{(s)} \forall i$, $\varepsilon_k = 0,5$ e $\chi_k = 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 50, 100$. A seta indica o sentido de crescimento de χ_k .

de transmissão das estações rádio-bases podem ser levados em consideração. Portanto, diferentes perfis de interferência podem ser levados em consideração, contemplando ainda mais a propriedade de *soft capacity* inerente a sistemas CDMA. Essa propriedade, que pode ser vista diretamente através da análise do parâmetro F na equação (2.20), está agora representada no parâmetro L_k . Vale salientar que o parâmetro L_k foi definido utilizando perdas de percurso modeladas pelo decaimento exponencial, que podem ser facilmente substituído por qualquer outro tipo de modelo, como o sombreamento log-normal ou o desvanecimento de termo curto.

Nas Figuras 4.2 e 4.3, podemos notar que no caso de um sistema com potências alocadas de forma não-uniforme, o que certamente se aproxima mais de alguns casos reais, as diferenças entre as curvas de ρ_k em função de I_k e L_k aumentam de forma significativa, mostrando a maior flexibilidade da nova fórmula adotada. Na Figura 4.2, temos que as células interferentes i estão operando com metade da potência da célula servi-

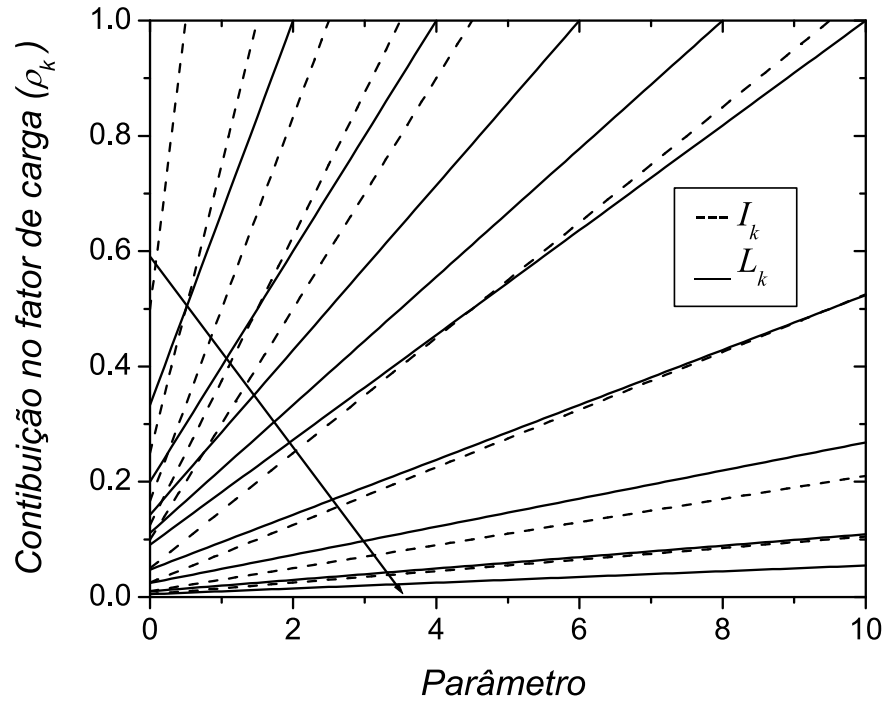


Figura 4.2: Gráfico do fator de carga em função de I_k (linha tracejada) e L_k (linha sólida) para $P_T^{(i)} = 0,5P_T^{(s)} \forall i$, $\varepsilon_k = 0,5$ e $\chi_k = 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 50, 100$. A seta indica o sentido de crescimento de χ_k .

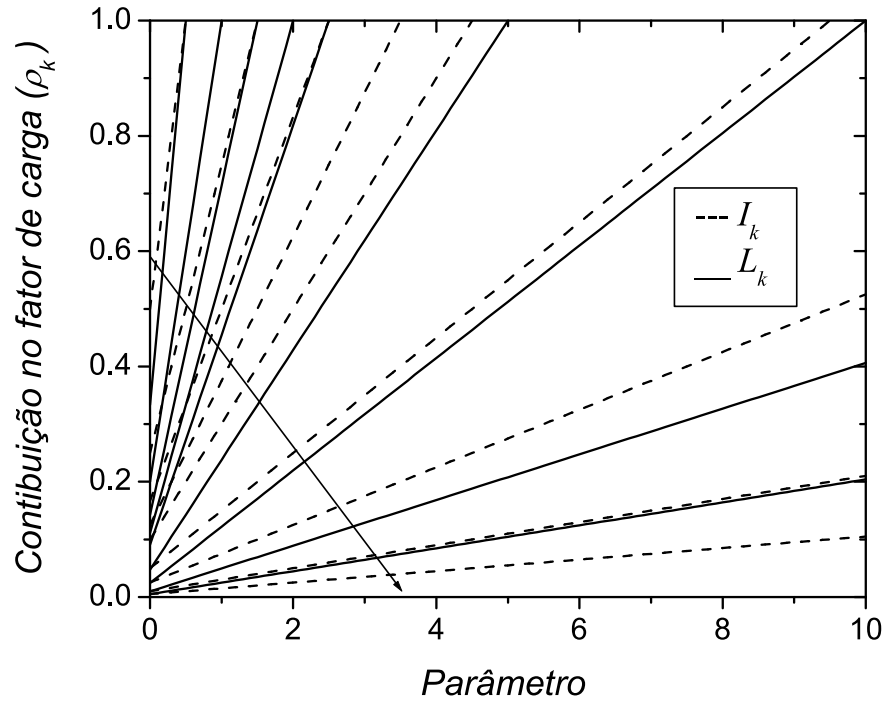


Figura 4.3: Gráfico do fator de carga em função de I_k (linha tracejada) e L_k (linha sólida) para $P_T^{(i)} = 2P_T^{(s)} \forall i$, $\varepsilon_k = 0,5$ e $\chi_k = 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 50, 100$. A seta indica o sentido de crescimento de χ_k .

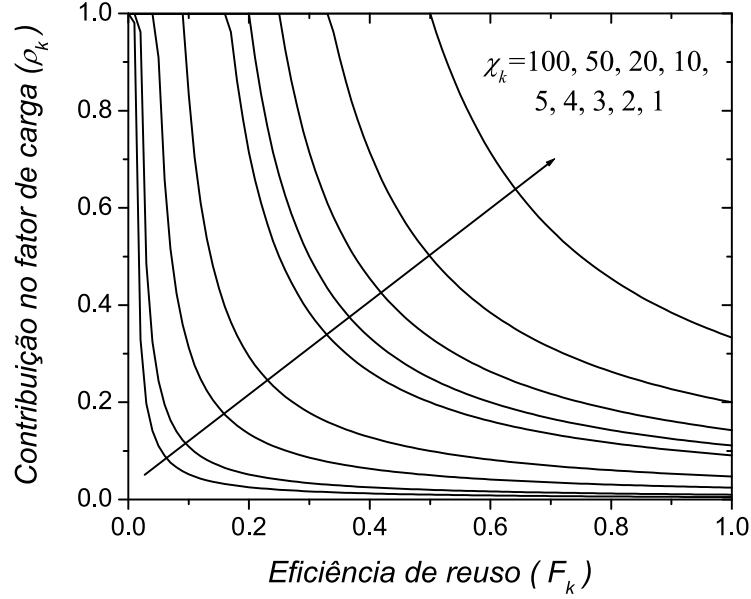


Figura 4.4: Gráfico da contribuição no fator de carga em função da eficiência de reuso para $P_T^{(i)} = P_T^{(s)} \forall i$, $\varepsilon_k = 0, 5$ e $\chi_k = 100, 50, 20, 10, 5, 4, 3, 2, 1$.

dora s , isto é, $P_T^{(i)} = 0, 5P_T^{(s)} \forall i$. Já na Figura 4.3, temos que as células interferentes i estão operando com o dobro da potência da célula servidora s , isto é, $P_T^{(i)} = 2P_T^{(s)} \forall i$.

A eficiência de reuso de frequências pode ser utilizada na fórmula de capacidade através do fator de carga utilizando a equação (3.9), de onde pode-se obter que:

$$L_k = \frac{\varepsilon_k(1 - F_k)(1 + \chi_k)}{\varepsilon_k - 1 + F_k(1 + \chi_k)} \quad (4.15)$$

Combinando as equações (4.15) e (4.13), tem-se que:

$$\rho = \sum_{k=1}^N \frac{v_k \varepsilon_k}{\varepsilon_k - 1 + F_k(1 + \chi_k)} \quad (4.16)$$

Assim, a contribuição ao fator de carga ρ_k para o usuário k será dada por:

$$\rho_k = \frac{v_k \varepsilon_k}{\varepsilon_k - 1 + F_k(1 + \chi_k)} \quad (4.17)$$

para $F_k \geq (1 - \varepsilon_k)/(\chi_k + 1)$. Note que o fator F_k é uma função dos parâmetros ε_k , χ_k e L_k . A Figura 4.4 mostra a variação de ρ_k em relação à eficiência de reuso de frequências para $\varepsilon_k = 0,5$, $v_k = 1$ e diferentes valores de χ_k . Observa-se que, para valores de F_k próximos de 1 (menos interferência gerada fora da célula), o fator de carga é o mais baixo possível. Verifica-se também que o fator de carga atinge o valor unitário à medida que F_k decresce, e isso ocorre mais rápido para serviços de altas taxas de transmissão.

4.3 Aplicações da fórmula de capacidade

Uma das aplicações da fórmula de capacidade de pólo obtida na Seção 4.2 consiste no planejamento e dimensionamento de sistemas celulares multi-serviços. Através do planejamento e do dimensionamento, é possível ter uma idéia antes da implantação e funcionamento do sistema, de quais serviços e em que locais podem ser atendidos pela rede de células proposta. Para tanto, é necessário um conhecimento prévio do ambiente de propagação e da topologia desta rede celular. Quanto mais preciso forem essas informações, maior será a eficiência do planejamento e do dimensionamento.

O dimensionamento através da fórmula da capacidade utiliza o fator de carga ρ como parâmetro básico para análise. Cada usuário, com seu respectivo serviço, deve contribuir com uma quantidade ρ_k no fator de carga da célula. O fator de carga pode crescer até atingir um valor máximo ρ_{max} definido previamente a fim de garantir qualidade de serviço satisfatória. O valor limite ρ_{max} geralmente possui valor de 0,5, o que garante uma potência de transmissão da estação rádio-base 3 dB acima da potência de ruído. Assim, é possível determinar até onde determinados serviços são garantidos e sob quais condições de ocupação dos recursos de rádio.

A seguir, serão mostrados exemplos para dimensionamento da capacidade de sistemas CDMA multi-taxas, utilizando os serviços contemplados para os sistemas WCDMA e cdma2000.

Serviço	R_k (kbps)	v_k	W/R_k	$(Eb/Nt)_k$ (dB)	χ_k
Voz	12,2	0,5	314,75	7	62,8
Fax-Modem	57,6	1	66,67	10	6,67
Vídeo	128	1	30	10	3
Dados	384	1	10	10	1

Tabela 4.1: Exemplos de serviços para o sistema WCDMA.

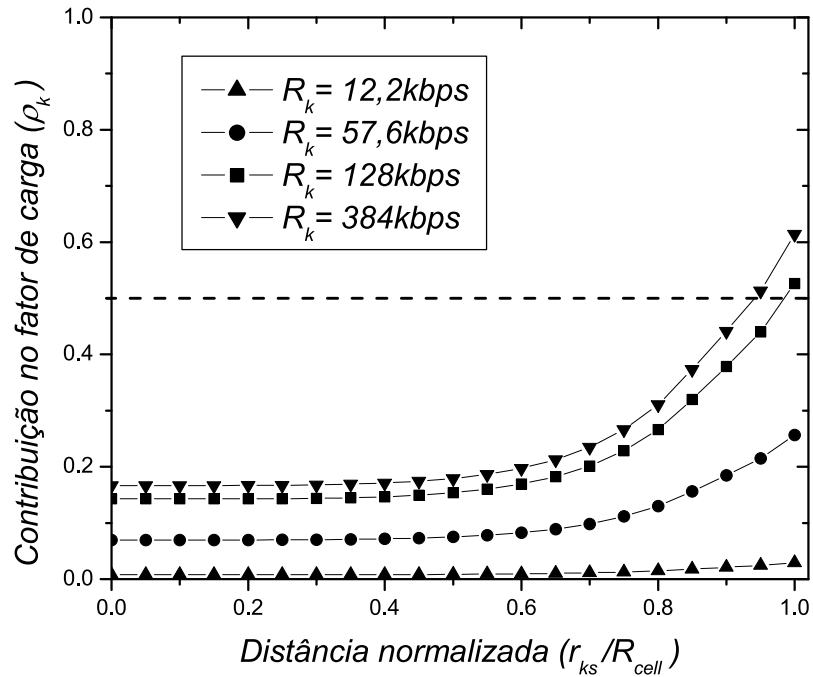


Figura 4.5: Gráfico da contribuição no fator de carga em função da distância para o sistema WCDMA com $\varepsilon_k = 0,5$ e $R_k = 12,2; 57,6; 128; 384$ kbps em uma célula central de rede de 4 anéis. A linha tracejada representa $\rho_{max} = 0,5$.

4.3.1 WCDMA

Para aplicação da fórmula da capacidade no sistema WCDMA foram utilizados os serviços definidos nas especificações do *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) [27]. A Tabela 4.1 mostra alguns serviços, caracterizados por suas taxas de transmissão, fator

de atividade, fator de espalhamento, relação sinal-ruído e valores de *jamming margin* [27, 28, 29]. Para tanto, foi utilizado $W = 3,84$ Mcps.

Utilizando os valores médios $\overline{L_k}$ para a célula central de uma rede 4 anéis com $\alpha = 4$, $\varepsilon_k = 0,5$ e $P_T^{(i)} = P_T^{(s)} \forall i$, mostrados na Figura 3.9, e a Equação (4.14), obtemos os gráficos mostrados na Figura 4.5. Nessa Figura temos as contribuições no fator de carga para os diferentes serviços da Tabela 4.1 em função da distância normalizada do usuário à estação rádio-base.

Analisando a Figura 4.5, observa-se que até metade do raio da célula, aproximadamente, os valores de ρ_k praticamente não variam. A partir deste ponto os valores de ρ_k crescem mais rapidamente, principalmente para taxas mais altas.

Por exemplo, se considerarmos um fator de carga máximo ρ_{max} de 0,5, representado na Figura 4.5 por uma linha tracejada, um usuário de dados ($R_k = 384$ kbps), possui cobertura até aproximadamente $0,9R_{cell}$. Caso esteja a tal distância, ele sozinho necessita de todos os recursos disponíveis para a célula. Tal usuário equivale, em termos de dispêndio dos recursos, a 2 usuários de *fax-modem* ($R_k = 57,6$ kbps) a uma mesma distância ($0,9R_{cell}$). Os usuários de voz possuem uma contribuição no fator de carga relativamente baixa e quase invariável ao longo de toda a célula.

4.3.2 cdma2000 (1xEVDO)

De forma análoga ao exemplo para o sistema WCDMA, para ilustrar a aplicação da fórmula da capacidade no sistema 1xEVDO foram utilizados os serviços definidos nas especificações do *3rd Generation Partnership Project 2* (3GPP) [7] e no documento [8] da *Qualcomm*. Assim, temos a Tabela 4.2 que mostra alguns serviços, caracterizados por suas taxas de transmissão, fator de atividade, fator de espalhamento, relação sinal-ruído e valores de *jamming margin* [7, 28, 29]. Neste exemplo foi utilizado $W = 2 \times 1,2288$ Mcps, visto que, na modulação complexa do sistema 1xEVDO, utilizam dois bits diferentes por símbolo de modulação, e não o mesmo bit como no sistema IS-95 e WCDMA.

Da mesma forma, para a célula central de uma rede 4 anéis com $\alpha = 4$, $\varepsilon_k = 0,5$ e $P_T^{(i)} = P_T^{(s)} \forall i$, utilizando os valores médios $\overline{L_k}$ da Figura 3.9, e a Equação (4.14),

Serviço	R_k (kbps)	v_k	W/R_k	$(Eb/Nt)_k$ (dB)	χ_k
Voz	9,6	0,5	256	7	51,08
Fax-Modem	76,8	1	32	10	3,2
Vídeo	144	1	17,07	10	1,707
Dados	384	1	6,4	10	0,64

Tabela 4.2: Exemplos de serviços para o sistema 1xEVDO.

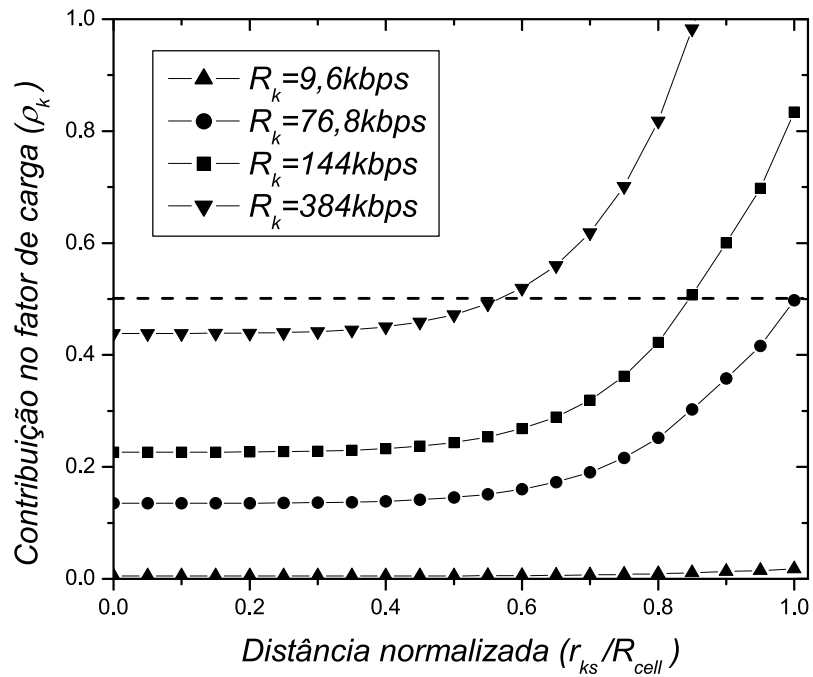


Figura 4.6: Gráfico da contribuição no fator de carga em função da distância para 1xEVDO com $\varepsilon_k = 0,5$ e $R_k = 9,6; 76,8; 144; 384$ kbps em uma célula central de rede de 4 anéis. A linha tracejada representa $\rho_{max} = 0,5$.

obtemos os gráficos mostrados na Figura 4.6, onde são mostradas as contribuições no fator de carga para os diferentes serviços da Tabela 4.2 em função da distância normalizada do usuário à estação rádio-base.

Analisando a Figura 4.6, observa-se que os valores de ρ_k permanecem pratica-

mente constantes apenas até $0,4R_{cell}$. A partir deste ponto os valores de ρ_k crescem mais rapidamente, principalmente para taxas mais altas. Entretanto, o serviço de voz ($R_k = 9,6$ kbps) possui uma contribuição no fator de carga quase invariável ao longo da célula.

Para um fator de carga máximo ρ_{max} de 0,5, representado na Figura 4.5 por uma linha tracejada, os usuários de dados ($R_k = 384$ kbps) só podem ser atendidos até a distância de quase $0,6R_{cell}$, sendo que para esta distância, eles devem estar sozinhos. Para essa mesma distância, é possível atender dois usuários de vídeo ($R_k = 144$ kbps) também sozinhos.

4.3.3 Comparação entre os Sistemas WCDMA e 1xEVDO

Comparando as Figuras 4.5 e 4.6, observa-se que ambos os sistemas conseguem prover um serviço de dados a uma alta taxa de transmissão (384 kbps).

A diferença entre os valores de ρ_k para serviços de taxas equivalentes, mas de sistemas diferentes, ocorre devido a diferença entre as larguras de banda de transmissão dos dois sistemas. O WCDMA por ter sido projetado com uma banda de transmissão mais larga consegue chegar a taxas mais altas, comportando mais usuários, que o sistema 1xEVDO.

Em ambos os casos, é fácil notar as restrições de cobertura para usuários de taxas mais altas, o que pode vir a ser um grande problema para tais usuários. Portanto, teremos áreas de coberturas diferentes para cada tipo de serviço.

4.3.4 Outras aplicações

As Figuras 4.5 e 4.6 podem ser utilizadas também no controle de admissão de assinantes e no gerenciamento de recursos de rádio. A admissão do usuário podem ser decidida com base no ρ_{max} de operação. Se o somatório dos parâmetros ρ_k presentes no sistema adicionado à contribuição $\rho_{k\ novo}$ do novo usuário resultarem em um fator de carga maior que um ρ_{max} pré-estabelecido, isto é, se:

$$\sum_{i=1}^N \rho_k + \rho_{k \text{ novo}} > \rho_{max} \quad (4.18)$$

então o usuário é rejeitado, ou inicia-se um processo de negociação de mudança de serviço. Caso contrário, o usuário pode ser aceito.

Após admissão, os usuários são constantemente monitorados, com o intuito de manter a qualidade de serviço para todos eles. Se um usuário se afasta da estação rádio-base ou por algum outro motivo sua relação sinal-ruído piora, ocorre um aumento no fator de carga e cabe ao gerenciamento de recursos de rádio não deixar que este não ultrapasse um ρ_{max} , reduzindo a taxa do usuário ou, se necessário, terminando a sua conexão.

4.4 Conclusões

Neste capítulo foi feita uma análise da determinação da capacidade em sistemas CDMA multi-taxas para o enlace direto. Vimos que, para sistemas 3G, a capacidade deve ser calculada de uma nova forma, através da fórmula da capacidade de pólo. A partir da dedução desta fórmula, constatamos as suas limitações e derivamos uma nova fórmula mais abrangente. Essa fórmula leva em consideração a variação entre as potências das estações rádio-bases ao longo da rede, o que está relacionado com a propriedade de *soft-capacity*, inerente a sistemas CDMA. Ela também apresenta um cálculo mais preciso da interferência dentro da célula.

A fórmula da capacidade de pólo não faz uso da eficiência de reuso de frequências. Foi deduzida então uma expressão que utiliza-se tal parâmetro.

Ao final, mostramos alguns exemplos de aplicação da nova fórmula da capacidade, utilizando-a para planejamento e dimensionamento de sistemas multi-taxas, através da análise da contribuição no fator de carga para vários serviços ao longo da célula. Foram feitos exemplos para os sistemas WCDMA e cdma2000. Outras aplicações apontadas foram o controle de admissão e o gerenciamento de recursos de rádio.

Capítulo 5

Considerações Finais

Neste trabalho foi feita uma análise da eficiência de reuso de frequências (F) para o enlace direto de sistemas de múltiplos serviços. Vimos no Capítulo 2 a importância desse parâmetro no dimensionamento de sistemas celulares, principalmente no que se refere ao cálculo de capacidade.

A análise de tal parâmetro, desenvolvida no Capítulo 3, foi feita para o enlace direto, visto que, em virtude da característica assimétrica do tráfego destes serviços e dos motivos apresentados na seção 2.4, este é o enlace limitante. Foi então derivada a expressão para a eficiência de reuso de frequências, onde observou-se que o valor de F necessário para o atendimento satisfatório do usuário varia rapidamente para taxas de transmissão mais altas ou requisitos de qualidade de serviço mais restritivos, isto é, níveis necessários de SIR altos. Já para taxas menores e baixos limiares de relação sinal-interferência, quase não ocorre variações para a eficiência de reuso de frequências. Isto leva à conclusão de que a estimação deste parâmetro deve ser a mais acurada possível para o correto dimensionamento de sistemas sem fio multi-taxas.

No capítulo 4 foi feita uma análise da determinação da capacidade em sistemas CDMA multi-taxas para o enlace direto. Foram encontradas algumas limitações para a fórmula de capacidade de pólo. Deduzimos então uma nova fórmula mais compatível com situações reais. Esta fórmula leva em consideração as diferenças entre as potências das ERBs e uma definição mais precisa da interferência gerada na célula servidora. Analisamos também como diferentes serviços nos sistemas de Terceira Geração ocupam os recursos de uma célula.

As contribuições dessa tese auxiliam de forma importante na criação de aplicações para dimensionamento de tráfego de sistemas CDMA multi-taxas e para o funcionamento pleno desses sistemas e atendimento satisfatório de seus usuários.

5.1 Trabalhos Futuros

Este trabalho abordou alguns problemas relacionados à eficiência de reuso de frequências e à capacidade de sistemas de múltiplos serviços. Contudo, vários outros tópicos derivados deste trabalho podem ser estudados no futuro, dentre os quais se destacam:

- Análise de F para outros ambientes de propagação e desvanecimento;
- Análise de F em sistemas multi-taxas para o enlace reverso;
- Desenvolvimento de algoritmos de controle de admissão e gerenciamento de recursos de rádio baseados na nova fórmula de capacidade;
- Derivação de uma nova fórmula de capacidade mais realista, considerando características inerentes à cada tipo de serviço;
- Integração dos métodos propostos com uma plataforma de predição de cobertura.

Referências Bibliográficas

- [1] Hélio Waldman e Michel D. Yacoub. *Telecomunicações: Princípios e Tendências*. Editora Érica, 1997.
- [2] Tero Ojanperä e Ramjee Prasad. *Wideband CDMA for Third Generation Mobile Communications*. Artech House Publishers, 1998.
- [3] C. K. d'Ávila e M. D. Yacoub. Impacto da Eficiência de Reuso e da Densidade de Tráfego na Predição de Cobertura CDMA. In *SBT'99*, Vila Velha (ES), Brasil, September 1999.
- [4] Andrew J. Viterbi. *CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication*. Addison-Wesley, 1995.
- [5] Harry Holma e Antti Toskala. *WCDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications*. John Wiley & Sons, 2000.
- [6] John G. Proakis. *Digital Communications*. McGraw- Hill, 1995.
- [7] 3GPP2 C.S0002 Version 3.0. Physical Layer Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems. Technical report, 3rd Generation Partnership Project 2, 2001.
- [8] 1xEVolution IS-856 TIA/EIA Standard Revision 7.1. Airlink Overview. Technical report, Qualcomm, Inc., 2001.
- [9] William C. Jakes. *Microwave Mobile Communications*. IEEE Press, 1974.
- [10] C. K. d'Ávila e M. D. Yacoub. Reuse Efficiency for Non-uniform Traffic Distributions in CDMA Systems. *Electronics Letters*, 34(13):1293–1294, June 1998.

- [11] C. K. d'Ávila e M. D. Yacoub. Frequency Reuse Efficiency in CDMA Systems: from an Uniform to a Bell-shaped Traffic Distribution. In *ITS'98 Proceedings*, volume 1, pages 161–165, São Paulo (SP), Brasil, August 1998.
- [12] C. K. d'Ávila e M. D. Yacoub. The Linear Method to Evaluate the Frequency Reuse Efficiency of Cellular CDMA Systems. In *Proceedings of the Globecom '99*, volume 1a, pages 127–131, Rio de Janeiro (RJ), Brasil, December 1999.
- [13] C. K. d'Ávila e M. D. Yacoub. Reuse Efficiency in a Quasi-Real CDMA Networks. In *Proceedings of the PIMRC'2000*, volume 1, pages 87–91, Londres, Inglaterra, sep 2000.
- [14] DongSeung Kwon, EungSoon Shin, JaeHeung Kim, e InMyoung Jeong. Effects of Path Loss and Cell Loading on Frequency Reuse Efficiency and Soft Handoff in CDMA System. *IEICE Trans. Fundamentals*, E79-A.
- [15] Kari Sipilä, Zhi-Chun Honkasalo, Jaana Laiho-Steffens, e Achim Wacker. Estimation of Capacity and Required Transmission Power of WCDMA Downlink Pole Equation. In *Proceedings of VTC'2000*, volume 2, pages 1002–1005, Tokyo, Japan, 2000.
- [16] Kyoung Il Kim. CDMA Cellular Engineering Issues. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 42(3):345–350, August 1993.
- [17] César Kyn D'Ávila. *Eficiência de Reuso para Perfis Genéricos de Tráfego em Sistemas CDMA*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 1998.
- [18] A. Papoulis. *Probability Random Variables and Stochastic Processes*. McGraw-Hill, 1991.
- [19] C. K. d'Ávila e M. D. Yacoub. Método Linear para o Cálculo da Eficiência de Reuso de Frequências do Enlace Reverso em Sistemas Celulares CDMA. In *SBT'99*, Vila Velha (ES), Brasil, September 1999.
- [20] C. K. d'Ávila e M. D. Yacoub. Eficiência de Reuso em Redes Celulares CDMA Quase Reais. In *SBT'2000*, Gramado (RS), Brasil, September 2000.

- [21] Michel D. Yacoub. *Wireless Technology: Protocols, Standards, and Techniques*. CRC Press, 2001.
- [22] M. Hunukumbure, M. Beach, e B. Allen. Downlink Orthogonality Factor in Factor UTRA FDD Systems. *Electronics Letters*, 38(4).
- [23] Klein S. Gilhousen, Irwin M. Jacobs, Roberto Padovani, Andrew J. Viterbi, Lindsay A. Weaver, Jr., e Charles E. Wheatley. On the Capacity of a Cellular CDMA System. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 40(2):303–312, May 1991.
- [24] Jane Pöllönen. Quality of Service Based Admission Control for WCDMA Mobile Systems. Master’s thesis, Helsinki University of Technology, Department of Engineering Physics and Mathematics, 2001.
- [25] Jhong S. Lee e Leonard E. Miller. *CDMA Systems Engineering Handbook*. Artech House Publishers, 1998.
- [26] Samuel C. Yang. *CDMA RF System Engineering*. Artech House Publishers, 1998.
- [27] 3GPP TR 25.944 Version 3.5.0. Channel coding and multiplexing examples. Technical report, 3rd Generation Partnership Project, 2001.
- [28] Cristina Comaniciu, Narayan B. Mandayam, David Famolari, e Prathima Agrawal. QoS Guarantees for Third Generation (3g) CDMA Systems via Admission and Flow Control. In *Proceedings of VTC’2000*, volume 1, pages 249–256, Boston, EUA, 2000.
- [29] Rahim Tafazolli e Georgios Sfikas Nikos Dimitriou. Quality of Service for Multimedia CDMA. *IEEE Communications Magazine*, 38(7):2–29, July 2000.