

Eficiência de Reuso para Perfis Genéricos de Tráfego em Sistemas CDMA

César Kyn d'Ávila

Orientador
Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da
Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para
obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Campinas, 18 de dezembro de 1998.

Este exemplar corresponde a redação final da tese
defendida por: CÉSAR KYN D'ÁVILA
e aprovada pela Comissão
Julgada em 18 / 12 / 1998.
Michel Daoud Yacoub
Orientador

Agradecimentos

Agradeço a todos que de alguma forma colaboraram com a realização desta tese de doutorado. Em especial, agradeço ao meu orientador, Michel Daoud Yacoub, pela inquestionável contribuição ao trabalho.

Agradeço também à CAPES e à FAPESP pelo suporte financeiro proporcionado, e à minha família, Adeline e Esther, aos meus pais Saul e Tiyoka e ao meu irmão Marcos Akira pelo apoio durante as dificuldades.

Resumo

Este trabalho propõe métodos exatos e simples para o cálculo da eficiência de reuso para o enlace reverso em sistemas CDMA com perfis genéricos de tráfego. Estes métodos baseiam-se em processos de redistribuição e decomposição do perfil original de tráfego e em curvas padrão. Estas curvas são obtidas para as mais variadas situações do coeficiente de perda de percurso e condições de desvanecimento de longo prazo, e são dadas em função da razão *tráfego máximo por tráfego mínimo* nos diversos anéis de células circundando a célula central. O primeiro método se aplica a uma distribuição planar de tráfego enquanto que o segundo método reduz esta distribuição planar a uma distribuição linear equivalente. Ambos os métodos apresentam alto desempenho computacional quando comparado com os métodos tradicionais. Para uma aplicação prática os métodos tradicionais tornam-se inviáveis devido ao tempo exigido para o cálculo, que pode chegar a várias horas para um conjunto de células distribuídas em poucos anéis. Os métodos propostos solucionam de maneira eficiente esta questão fornecendo resultados de forma instantânea.

A is A.

Personagem John Galt do livro *Atlas
Shrugged* de Ayn Rand

À Adélice e Esther.

Sumário

1	Introdução	11
1.1	Arquiteturas de Acesso Múltiplo	11
1.2	Planejamento de Sistemas Rádio-Móveis Celulares CDMA	13
1.3	Proposta do Trabalho	14
1.4	Contribuições do Trabalho	15
2	Predição de Cobertura em Sistemas Celulares CDMA	16
2.1	Cobertura de um Sistema CDMA com uma Única Célula	16
2.1.1	Enlace Reverso	17
2.1.2	Enlace Direto	18
2.2	Cobertura de um Sistema CDMA com Múltiplas Células	19
2.2.1	Enlace Reverso	20
2.2.2	Enlace Direto	20
2.3	Exemplo de Cálculo de Cobertura	21
2.4	Eficiência de Reuso de Frequências	22
2.4.1	Enlace Reverso	23
2.4.2	Enlace Direto	27
2.5	Conclusões	29
3	Conjectura sobre o Impacto da Eficiência de Reuso na Cobertura CDMA	31
3.1	Equação Geral para os Enlaces Reverso e Direto	31
3.2	Avaliando o Impacto de F sobre r	33
3.3	Conclusões	39
4	Eficiência de Reuso de Frequências do Enlace Reverso em Sistemas com Perfis Genéricos de Tráfego	40
4.1	Introdução	40

4.2	Processo de Redistribuição de Tráfego (PRT)	41
4.3	Processo de Decomposição de Tráfego (PDT)	42
4.4	Processo de Avaliação Parcial (PAP)	44
4.5	Processo de Avaliação Final (PAF)	45
4.6	Exemplo	48
4.7	Conclusões	48
5	Curvas Padrão para Ambientes com Desvanecimento Lognormal	50
5.1	Equação Geral Para as Curvas Padrão	51
5.2	Coefficientes para Desvanecimento Lognormal	52
5.3	Exemplo	55
5.4	Conclusões	55
6	Método Linear	64
6.1	Processo de Linearização de Tráfego (PLT)	66
6.2	Processo Linear de Decomposição de Tráfego (PLDT)	66
6.3	Processo Linear de Avaliação Parcial (PLAP)	68
6.4	Processo Linear de Avaliação Final (PLAF)	69
6.5	Conclusões	70
7	Considerações Finais	78
A	Eficiência de Reuso para Ambientes com Desvanecimento Lognormal	80
B	Plataforma de Simulação	83
B.1	Introdução	83
B.2	Classes Funcionais	84
B.3	Classes Celular	85
B.4	Plataforma de Simulação para o Cálculo da Eficiência de Reuso de Frequências	86

Lista de Tabelas

1.1	Caso mais comum de número de células por cluster (N_{cc}) em diferentes sistemas de telefonia celular em operação no Brasil na situação de células com 3 setores.	13
2.1	Valores de eficiência de reuso de frequências (F) para diferentes ambientes de propagação (γ, σ) no enlace reverso na condição de tráfego uniforme no sistema.	26
2.2	Valores de F médio na área para diferentes ambientes de propagação no enlace direto na condição de tráfego uniforme no sistema.	29
2.3	Valores de F médio na área no enlace direto para diferentes situações de tráfego em ambientes com desvanecimento lognormal $\gamma = 4$ e $\sigma = 8$ dB.	29
3.1	Especificações para a cobertura de uma célula.	33
3.2	Coefficientes A, B e C calculados.	33
3.3	Informações de perda de percurso em diferentes ambientes.	34
5.1	Coefficientes $[A, B]$ relativos às curvas padrão da Figura 4.4.	52
5.2	Coefficientes $[A, B]$ relativos às curvas padrão de ambientes com $\gamma = 2,0$ e desvanecimento lognormal σ	57
5.3	Coefficientes $[A, B]$ relativos às curvas padrão de ambientes com $\gamma = 2,5$ e desvanecimento lognormal σ	58
5.4	Coefficientes $[A, B]$ relativos às curvas padrão de ambientes com $\gamma = 3,0$ e desvanecimento lognormal σ	59
5.5	Coefficientes $[A, B]$ relativos às curvas padrão de ambientes com $\gamma = 3,5$ e desvanecimento lognormal σ	60
5.6	Coefficientes $[A, B]$ relativos às curvas padrão de ambientes com $\gamma = 4,0$ e desvanecimento lognormal σ	61

5.7	<i>Coeficientes $[A, B]$ relativos às curvas padrão de ambientes com $\gamma = 4,5$ e desvanecimento lognormal σ.</i>	62
5.8	<i>Coeficientes $[A, B]$ relativos às curvas padrão de ambientes com $\gamma = 5,0$ e desvanecimento lognormal σ.</i>	63
6.1	<i>Coeficientes $[A, B]$ para funções platô linear em ambientes com $\gamma = 2,0$ e desvanecimento lognormal σ.</i>	71
6.2	<i>Coeficientes $[A, B]$ para funções platô linear em ambientes com $\gamma = 2,5$ e desvanecimento lognormal σ.</i>	72
6.3	<i>Coeficientes $[A, B]$ para funções platô linear em ambientes com $\gamma = 3,0$ e desvanecimento lognormal σ.</i>	73
6.4	<i>Coeficientes $[A, B]$ para funções platô linear em ambientes com $\gamma = 3,5$ e desvanecimento lognormal σ.</i>	74
6.5	<i>Coeficientes $[A, B]$ para funções platô linear em ambientes com $\gamma = 4,0$ e desvanecimento lognormal σ.</i>	75
6.6	<i>Coeficientes $[A, B]$ para funções platô linear em ambientes com $\gamma = 4,5$ e desvanecimento lognormal σ.</i>	76
6.7	<i>Coeficientes $[A, B]$ para funções platô linear em ambientes com $\gamma = 5,0$ e desvanecimento lognormal σ.</i>	77
B.1	<i>Classes funcionais utilizadas na implementação da plataforma de simulação.</i>	84
B.2	<i>Classes celular utilizadas na implementação da plataforma de simulação.</i>	85

Lista de Figuras

1.1	<i>Protocolos de Acesso Múltiplo.</i>	12
2.1	<i>Sistema celular com dois anéis para o cálculo da eficiência de reuso de freqüências no enlace reverso.</i>	24
2.2	<i>Sistema celular com dois anéis para o cálculo da eficiência de reuso de freqüências no enlace direto.</i>	27
3.1	<i>r versus F no enlace reverso em uma situação de alto tráfego (10 assinantes/km^2) para diferentes ambientes de propagação.</i>	34
3.2	<i>r versus F no enlace direto em uma situação de alto tráfego (10 assinantes/km^2) para diferentes ambientes de propagação.</i>	35
3.3	<i>r versus F no enlace reverso - densidade de tráfego baixa (0,1 assinantes/km^2).</i>	36
3.4	<i>r versus F no enlace direto - densidade de tráfego baixa (0,1 assinantes/km^2).</i>	37
3.5	<i>Impacto de F em r no enlace reverso - densidade de tráfego alta (10 assinantes/km^2).</i>	38
3.6	<i>Impacto de F em r no enlace direto - densidade de tráfego alta (10 assinantes/km^2).</i>	39
4.1	<i>Fluxograma do novo método para o cálculo da eficiência de reuso de freqüências do enlace reverso para ambientes com tráfego não uniforme.</i>	41
4.2	<i>Processo de redistribuição de tráfego. Os tons de cinza indicam uma escala de concentração de tráfego.</i>	42
4.3	<i>Funções do processo de decomposição de tráfego. (a) Função $\rho_i \delta_i(x, y)$. (b) Função Platô - $K_m = H_i/p$.</i>	43
4.4	<i>Eficiência de reuso de freqüências para distribuições de tráfego platô.</i>	45

4.5	<i>Exemplo da aplicação do método em um sistema com tráfego não uniforme.</i>	49
5.1	<i>Curvas padrão para um ambiente com $\gamma = 4,0$ e $\sigma = 5,0$ dB.</i> . . .	53
5.2	<i>Curvas padrão para um ambiente com $\gamma = 4,0$ e $\sigma = 8,0$ dB.</i> . . .	53
5.3	<i>Curvas padrão para um ambiente com $\gamma = 3,0$ e $\sigma = 8,0$ dB.</i> . . .	54
5.4	<i>Curvas padrão para um ambiente com $\gamma = 5,0$ e $\sigma = 8,0$ dB.</i> . . .	55
5.5	<i>Cálculo da eficiência de reuso para um ambiente com $\gamma = 4,0$ e $\sigma = 8$ dB.</i>	56
6.1	<i>Fluxograma do método linear para o cálculo da eficiência de reuso de frequências do enlace reverso para ambientes com tráfego não uniforme.</i>	65
6.2	<i>Processo de linearização de tráfego (PLT).</i>	66
6.3	<i>Funções do processo linear de decomposição de tráfego. (a) Função $\rho_i \delta_i(x, y)$. (b) Função Platô Linear - $K_l = H_i/p$.</i>	68

Capítulo 1

Introdução

Em 1887, Guglielmo Marconi implementou o primeiro sistema de comunicação sem fio, através de ondas de rádio [1]. Desde então, grandes avanços na concepção dos sistemas e nas tecnologias empregadas foram feitos, sempre com o objetivo de melhorar a qualidade da transmissão dos sinais e aumentar a capacidade de tráfego.

Entretanto, nos últimos anos, verifica-se que o crescimento da capacidade não consegue acompanhar o aumento da demanda de serviços como o de telefonia celular [2, 3]. Dentro deste escopo, a implementação de novas arquiteturas de acesso múltiplo tornou-se uma das soluções mais aceitas para resolver este problema [4]. Aliadas às codificações digitais para a voz, às codificações de canal e ao planejamento com microcélulas, estas arquiteturas, tais como TDMA (Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo) e CDMA (Acesso Múltiplo por Divisão por Código) têm proporcionado significativos avanços.

1.1 Arquiteturas de Acesso Múltiplo

Sempre que um determinado recurso é acessado por mais de um usuário de forma independente aparece a necessidade de uma disciplina através de uma arquitetura de acesso múltiplo. Estas arquiteturas procuram evitar os conflitos na transmissão de informações. Entretanto, se porventura ocorrer um conflito, um protocolo de transmissão é que deve resolvê-lo. Nos sistemas celulares de comunicação por rádio, as arquiteturas mais comuns são : FDMA, TDMA e CDMA.

As arquiteturas FDMA (Acesso Múltiplo por Divisão em Frequência) e TD-

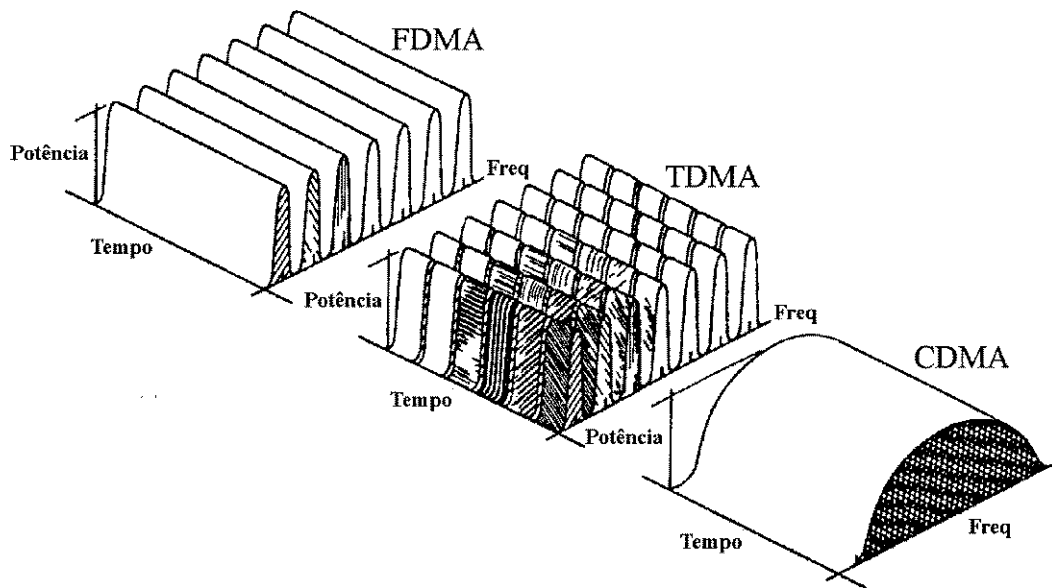


Figura 1.1: *Protocolos de Acesso Múltiplo.*

MA estão na categoria “sem colisão”¹, ou seja, evitam a situação de colisão através do agendamento da transmissão dos usuários; estão ainda na subcategoria “designação fixa”², ou seja, a cada usuário é designada uma parcela fixa da capacidade do canal mesmo quando nada é transmitido [4].

A diferença entre FDMA e TDMA está na forma como a capacidade do canal é dividida. No caso FDMA, os canais de transmissão são subdivisões no espectro de freqüências, e no TDMA, são subdivisões na forma de *slots* de tempo. A Figura 1.1 [5] ilustra esta comparação.

A arquitetura CDMA tem a sua propriedade de acesso múltiplo baseada na alocação de códigos diferentes para os usuários. Estes códigos transformam os sinais banda base dos assinantes em sinais faixa larga, que na recepção são decodificados com o uso dos respectivos códigos. Todos os sinais codificados são transmitidos no mesmo espectro de freqüências, e ao mesmo tempo (Figura 1.1), ou seja, na medida em que o número de usuários aumenta, a relação sinal-ruído (*SNR*) diminui. A arquitetura CDMA é classificada como “sem colisão” até um determinado limite de acessos simultâneos. A partir de um valor da *SNR*, passa a ser “com colisão”. Em aplicações como a telefonia celular,

¹Do inglês *contentionless*.

²Do inglês *fixed assignment*.

Tabela 1.1: Caso mais comum de número de células por cluster (N_{cc}) em diferentes sistemas de telefonia celular em operação no Brasil na situação de células com 3 setores.

SISTEMA	PROTOCOLO	
	DE ACESSO	N_{cc}
MÚLTIPLO		
AMPS	FDMA	7
IS-136	TDMA	7
IS-95	CDMA	1

procura-se trabalhar na situação “sem colisão”. Desta forma, para os sistemas CDMA a etapa de planejamento é muito importante para garantir um controle da SNR na operação, e conseqüentemente, um bom funcionamento.

1.2 Planejamento de Sistemas Rádio-Móveis Celulares CDMA

Uma etapa fundamental dentro de um projeto de um sistema rádio-móvel celular é a de planejamento. Nela são estudados problemas de dimensionamento visando a otimização do sistema. Um bom planejamento reduz de forma significativa os custos de implantação, operação e manutenção.

Um dos desafios do planejamento é ponderar qualidade de transmissão com tráfego atendido. O equilíbrio destes dois parâmetros deve ser encontrado a partir de especificações tais como SNR mínima, número de assinantes a serem atendidos, e área de cobertura do sistema. Uma variável que reflete esta ponderação é o número de células dentro de um *cluster* (N_{cc}). Quanto menor N_{cc} , pior a qualidade de transmissão devido à menor distância entre co-células, e maior a capacidade de tráfego devido a um reuso de canais mais eficiente [6]. Alguns valores de N_{cc} são apresentados na Tabela 1.1 para diferentes sistemas em operação no Brasil [7].

Na Tabela 1.1, tem-se que $N_{cc} = 7$ para os sistemas AMPS (FDMA) e IS-136 (TDMA). Este N_{cc} foi obtido para garantir uma relação sinal-ruído satisfatória em qualquer situação. Em conseqüência, posteriormente, na predição de cobertura, basta garantir um limiar de potência recebida pois o ruído já está controlado pela distância co-canal imposta. A predição de cobertura é feita através de modelos [8, 9, 10, 11, 12], geralmente incorporados a uma

plataforma de *software* [13, 14].

No sistema IS-95, CDMA, utiliza-se $N_{cc} = 1$, o que pode ser traduzido em alta capacidade de tráfego. À primeira vista, este fato facilita o planejamento, na medida em que um plano de frequências torna-se desnecessário. Entretanto, como mencionado na Seção 1.1, todas as transmissões na arquitetura CDMA são feitas sobre o mesmo espectro de frequências ao mesmo tempo, ou seja, todos os assinantes contribuem para a diminuição da SNR dos outros usuários. Portanto, na predição de cobertura CDMA, para garantir a qualidade do sinal dos assinantes, deve-se considerar a influência da distribuição de tráfego, e não apenas garantir um limiar de potência recebida como nos casos FDMA e TDMA. O fator de eficiência de reuso de frequências (F) mede justamente esta influência. Este fator é dependente do ambiente de propagação, da distribuição de tráfego e da posição das células. Sua precisão é muito importante pois determina a capacidade do sistema e a qualidade do planejamento [15]. Em consequência, vários trabalhos foram desenvolvidos para determinar a eficiência de reuso em diferentes situações [5, 15, 16, 17, 18, 19].

1.3 Proposta do Trabalho

A proposta desta tese de doutorado se resume em dois novos métodos para a determinação da eficiência de reuso de frequências no enlace reverso para perfis genéricos de tráfego. A maioria dos trabalhos desenvolvidos abordam apenas o caso de tráfego uniforme no sistema [16, 17, 18, 19]. Os poucos trabalhos que analisam casos de tráfego não uniforme são superficiais e estudam situações particulares sem a preocupação de um modelo mais geral [5, 15].

O trabalho está estruturado como se segue :

- Capítulo 2 - a descrição das formas de predição de cobertura CDMA e de determinação da eficiência de reuso de frequências.
- Capítulo 3 - uma conjectura sobre o impacto do fator F na predição de cobertura CDMA, mostrando a importância deste fator.
- Capítulo 4 - a descrição do primeiro método desenvolvido neste trabalho.
- Capítulo 5 - a ampliação do método para cobrir os casos de ambientes com desvanecimento lognormal.

- Capítulo 6 - a descrição do segundo método objeto desta tese, o qual foi desenvolvido a partir de uma modificação do primeiro, diminuindo a complexidade na aplicação.
- Capítulo 7 - as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

1.4 Contribuições do Trabalho

São as contribuições originais deste trabalho :

- Capítulo 3 - Conjectura sobre o impacto da eficiência de reuso no raio da célula.
- Capítulo 4 - Novo método para o cálculo da eficiência de reuso no enlace reverso em sistemas CDMA com perfis genéricos de tráfego.
- Capítulo 5 - Levantamento das curvas padrão para ambientes com desvanescimento lognormal.
- Capítulo 6 - O segundo método para o cálculo da eficiência de reuso.

Capítulo 2

Predição de Cobertura em Sistemas Celulares CDMA

Um dos desafios na predição de cobertura de um sistema celular é garantir uma qualidade de sinal satisfatória para toda a área de serviço. Para isto fixa-se uma relação sinal-ruído (SNR) mínima para os assinantes em conversação (ativos). Nos sistemas CDMA, o número de células por *cluster* é 1, e diversos assinantes utilizam uma mesma portadora ao mesmo tempo [4]. Desta forma, a distribuição do tráfego na área de serviço afeta a relação sinal-ruído e, conseqüentemente, tem influência nos cálculos de cobertura.

Nas Seções 2.1 e 2.2, serão apresentadas equações para a predição de cobertura de sistemas com uma única célula e com múltiplas células. A Seção 2.3 é reservada para o desenvolvimento de um exemplo. No caso de sistemas com múltiplas células, veremos que no cálculo de cobertura aparece um parâmetro conhecido como eficiência de reuso de frequências (F). Em linhas gerais, este parâmetro representa a interferência gerada pelo tráfego das outras células do sistema sobre uma célula alvo. Na Seção 2.4 serão apresentadas as equações para cálculo de F .

A Seção 2.5 apresentará as conclusões deste capítulo.

2.1 Cobertura de um Sistema CDMA com uma Única Célula

A cobertura de um sistema CDMA com uma única célula considera a interferência gerada pela existência de assinantes ativos. Neste caso, na recepção,

a relação portadora-ruído (CNR) é dada por :

$$CNR = \frac{C_0}{\mathcal{N}_0 W + I}, \quad (2.1)$$

onde C_0 é a potência da portadora do sinal recebido, \mathcal{N}_0 é a densidade espectral do ruído branco, W é a largura da banda de transmissão, e I é a interferência gerada pelos outros elementos do sistema, dada por :

$$I = \alpha \sum_{i=1}^{N-1} C_i, \quad (2.2)$$

onde N é o número de assinantes em conversação, C_i é a potência recebida do sinal do assinante i recebida, e α é a atividade média de voz dos assinantes do sistema.

2.1.1 Enlace Reverso

No enlace reverso, a cobertura da célula é determinada pela qualidade do canal de tráfego. Para este desenvolvimento, consideramos um controle de potência perfeito, ou seja

$$C_i = C \quad \forall i. \quad (2.3)$$

Combinando as Equações 2.1, 2.2 e 2.3 obtém-se

$$CNR = \frac{C}{\mathcal{N}_0 W + (N - 1)C\alpha}. \quad (2.4)$$

A CNR é ainda definida como [5]

$$CNR = \frac{E_b/\mathcal{N}_t}{G_p}, \quad (2.5)$$

onde E_b é a energia de bit, \mathcal{N}_t é a densidade espectral do ruído total, e G_p é o ganho de processamento dado pela razão da largura do canal CDMA (W) e da largura espectral do sinal transmitido (R).

Igualando as equações 2.4 e 2.5 e resolvendo para N , obtém-se

$$N = 1 + \frac{G_p}{\alpha(E_b/\mathcal{N}_t)} - \frac{\mathcal{N}_0 W}{C\alpha}. \quad (2.6)$$

Note que as variáveis C e N são funções do raio da célula. Estas dependências, para o caso do enlace reverso, são dadas por

$$C = \frac{P_{max}}{l_0 r^\gamma}, \quad (2.7)$$

onde P_{max} é a potência máxima efetivamente radiada pela unidade móvel, l_0 é um fator de proporcionalidade que define a perda básica de percurso, γ é o expoente de perda de percurso, e r é o raio da célula; e

$$N = \int_A \rho(x, y) dA, \quad (2.8)$$

onde $\rho(x, y)$ é a densidade de tráfego como uma função das variáveis de posição (x, y) , A é a área de cobertura da célula, e dA é a área infinitesimal.

Por conveniência substitui-se 2.7 em 2.6 obtendo-se

$$N = 1 + \frac{G_p}{\alpha (E_b/N_t)} - \frac{N_0 W l_0}{\alpha P_{max}} r^\gamma. \quad (2.9)$$

A partir da Equação 2.9 é possível calcular o raio de cobertura da célula. Um exemplo será desenvolvido na Seção 2.3.

2.1.2 Enlace Direto

No caso do enlace direto, a cobertura da célula é determinada pela qualidade do canal piloto. Este canal é uma referência para a detecção coerente do sinal na unidade móvel [20], e é transmitido com uma alocação fixa de potência. Neste caso, a potência C_0 do canal piloto recebida pelas unidades móveis é dada por

$$C_0 = \frac{\beta P_t}{l_0 r^\gamma}, \quad (2.10)$$

onde β é a proporção de potência alocada para o canal piloto, e P_t é a potência total máxima transmitida pela estação rádio base.

Conseqüentemente, os assinantes devem ser alocados dentro da potência restante. Desta forma, para um assinante i , a potência C_i é dada por

$$C_i = \frac{(1 - \beta) P_t}{N_{max} l_0 r^\gamma} \quad \forall i > 0, \quad (2.11)$$

onde N_{max} é o número máximo de assinantes que podem ser alocados na célula.

Quanto à interferência I (Equação 2.2), esta fica definida em função do número de assinantes ativos na célula, ou seja

$$I = \frac{\overbrace{(1-\beta)P_t}^{C_i}}{N_{max}l_0r^\gamma} \alpha N. \quad (2.12)$$

No caso do enlace direto, a CNR é ainda definida como

$$CNR = \frac{E_c}{N_t}, \quad (2.13)$$

onde E_c é a energia do *chip* do canal piloto.

Combinando as Equações 2.1, 2.10, 2.12 e 2.13 e resolvendo para N temos

$$N = \frac{\beta N_{max}}{(E_c/N_t)(1-\beta)\alpha} - \frac{N_0 W N_{max} l_0}{(1-\beta)P_t \alpha} r^\gamma. \quad (2.14)$$

Note que a Equação 2.14 tem uma formatação semelhante à Equação 2.9. Procuramos desenvolver as equações de predição de cobertura todas no mesmo formato para facilitar análises futuras.

2.2 Cobertura de um Sistema CDMA com Múltiplas Células

No projeto de um sistema celular, raramente é possível obter a cobertura total com apenas uma única célula. Em decorrência da limitada faixa do espectro de frequências alocada para os serviços rádio-móveis, o problema de suprir a demanda de assinantes obriga a utilização de várias estações rádio-base. Esta prática ocasiona interferência mútua entre os sinais de diferentes células, e, portanto, a relação portadora-ruído vale

$$CNR = \frac{C_0}{N_0 W + I_{mc} + I_{oc}}, \quad (2.15)$$

onde I_{mc} é a interferência gerada na mesma célula, e I_{oc} é a interferência gerada nas outras células.

Em seguida serão abordadas as particularidades dos casos do enlace reverso e direto.

2.2.1 Enlace Reverso

No enlace reverso, a interferência é causada pelos sinais de estações móveis ativas sobre o sinal recebido por uma estação rádio-base. Para uma situação de controle de potência perfeito (Equação 2.3), definimos as interferências I_{mc} e I_{oc} como

$$I_{mc} = (N - 1)C\alpha , \quad (2.16)$$

$$I_{oc} = \left(\frac{1}{F} - 1 \right) NC\alpha , \quad (2.17)$$

onde F é o fator de eficiência de reuso de frequências.

O fator F pode ser entendido como uma variável obtida a partir da normalização da interferência total do sistema (interferência gerada na própria célula mais a interferência gerada por outras células do sistema) em relação à interferência gerada por N assinantes na própria célula. Substituindo 2.16 e 2.17 em 2.15, obtém-se

$$CNR = \frac{C}{\mathcal{N}_0W + \left(\frac{N}{F} - 1 \right) C\alpha} . \quad (2.18)$$

Analogamente à dedução da Seção 2.1.1, iguala-se as Equações 2.5 e 2.18 obtendo-se

$$N = F + \frac{G_p F}{\alpha (E_b/N_t)} - \frac{\mathcal{N}_0 W F l_0}{P_{max} \alpha} r^\gamma . \quad (2.19)$$

2.2.2 Enlace Direto

No enlace direto, a interferência é causada pelos sinais de estações rádio-base sobre o sinal recebido por uma estação móvel. Neste caso, definimos as interferências I_{mc} e I_{oc} como

$$I_{mc} = NC_i\alpha , \quad (2.20)$$

$$I_{oc} = \left(\frac{1}{F} - 1 \right) NC_i\alpha . \quad (2.21)$$

Substituindo 2.20 e 2.21 em 2.15 tem-se que

$$CNR = \frac{C_0}{\mathcal{N}_0 W + \frac{(1-\beta) P_t \alpha}{N_{max} F l_0 r^\gamma} N}, \quad (2.22)$$

onde C_0 já foi definido na Equação 2.10.

Igualando as Equações 2.13 e 2.22 obtém-se

$$N = \frac{\beta N_{max} F}{(E_c/\mathcal{N}_t)(1-\beta)\alpha} - \frac{\mathcal{N}_0 W N_{max} F l_0}{(1-\beta) P_t \alpha} r^\gamma. \quad (2.23)$$

Neste caso, a eficiência de reuso de frequências pode ser determinada para cada ponto da área de cobertura da célula. Desta forma, o fator F utilizado na Equação 2.23 deve ser um valor médio calculado na área ou no perímetro da célula. Este problema será abordado com maiores detalhes na Seção 2.4.2.

2.3 Exemplo de Cálculo de Cobertura

As Equações 2.9, 2.14, 2.19 e 2.23 podem ser escritas como

$$N = \kappa_1 - \kappa_2 r^\gamma, \quad (2.24)$$

onde

$$\kappa_1 = \begin{cases} 1 + \frac{G_p}{\alpha (E_b/\mathcal{N}_t)} & \text{uma única célula no enlace reverso} \\ \frac{\beta N_{max}}{(E_c/\mathcal{N}_t)(1-\beta)\alpha} & \text{uma única célula no enlace direto} \\ F + \frac{G_p F}{\alpha (E_b/\mathcal{N}_t)} & \text{múltiplas células no enlace reverso} \\ \frac{\beta N_{max} F}{(E_c/\mathcal{N}_t)(1-\beta)\alpha} & \text{múltiplas células no enlace direto} \end{cases} \quad (2.25)$$

e

$$\kappa_2 = \begin{cases} \frac{N_0 W l_0}{P_{max} \alpha} & \text{uma única célula no enlace reverso} \\ \frac{N_0 W N_{max} l_0}{(1 - \beta) P_t \alpha} & \text{uma única célula no enlace direto} \\ \frac{N_0 W l_0 F}{P_{max} \alpha} & \text{múltiplas células no enlace reverso} \\ \frac{N_0 W N_{max} l_0 F}{(1 - \beta) P_t \alpha} & \text{múltiplas células no enlace direto} \end{cases} . \quad (2.26)$$

Considerando ainda uma distribuição de tráfego uniforme em toda a célula com formato hexagonal, e propagação no espaço livre, temos

$$N = \rho \frac{3\sqrt{3}}{2} r^2 , \quad (2.27)$$

$$\gamma = 2 . \quad (2.28)$$

Combinando-se as Equações 2.24, 2.27 e 2.28 determina-se o raio da célula como sendo

$$r = \sqrt{\frac{\kappa_1}{\rho \frac{3\sqrt{3}}{2} + \kappa_2}} . \quad (2.29)$$

A Equação 2.29 mostra que a partir das especificações do sistema e do ambiente de propagação, encontra-se o raio da célula com as equações propostas nas Seções 2.1 e 2.2.

2.4 Eficiência de Reuso de Frequências

A eficiência de reuso de frequências indica a redução de capacidade de uma célula, em um sistema com múltiplas células, quando comparado ao caso de um sistema com apenas uma célula [18], ou seja

$$\frac{1}{F} = \frac{\text{CAPACIDADE EM UM SISTEMA COM 1 CÉLULA}}{\text{CAPACIDADE EM UM SISTEMA COM MÚLTIPLAS CÉLULAS}} . \quad (2.30)$$

A partir desta definição, o fator F_j pode ser determinado para uma célula j como

$$F_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^M \frac{k_i}{k_j}} \quad 1 \leq j \leq M, \quad (2.31)$$

onde M é o número de células e k_i é a interferência da célula i sobre a célula j .

Os vários trabalhos publicados na literatura mostram que k_i depende basicamente do ambiente de propagação do sinal [15, 16, 17] e da distribuição de tráfego do sistema [5, 15]. Na seqüência desta seção, serão apresentadas as equações para a determinação de F nos enlaces reverso e direto.

2.4.1 Enlace Reverso

No enlace reverso, o parâmetro k_i pode ser calculado como uma função das condições de propagação e da densidade de tráfego da seguinte forma [16]

$$k_i = \kappa \int_{A_i} \left(\frac{r_s}{r_a} \right)^\gamma \rho(x, y) dA, \quad (2.32)$$

onde r_s é a distância da unidade móvel interferente para a estação rádio base servidora, r_a é a distância deste móvel para a estação rádio base alvo (a que sofre a interferência), A_i é a área de integração da célula i , e κ é uma constante que inclui a potência transmitida pelo móvel, fator de atividade de voz, e outros.

A Figura 2.1 apresenta um sistema hexagonal com dois anéis onde ilustramos algumas variáveis envolvidas no cálculo da eficiência de reuso. No caso da célula alvo da figura ($i = j$), a razão $r_s/r_a = 1$, logo a Equação 2.32 torna-se

$$k_j = \kappa \int_{A_j} \rho(x, y) dA. \quad (2.33)$$

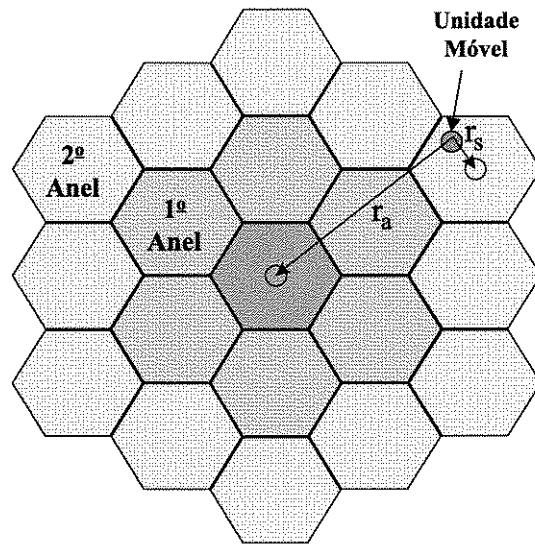


Figura 2.1: Sistema celular com dois anéis para o cálculo da eficiência de reuso de frequências no enlace reverso.

Note que na Equação 2.33, a integral na área A_j resultará no número N de assinantes ativos na célula alvo. Combinando as Equações 2.31, 2.32 e 2.33 encontra-se uma expressão final para o parâmetro de eficiência de reuso no enlace reverso, ou seja

$$F_j = \frac{\int_{A_j} \overbrace{\rho(x, y)}^N dA}{\sum_{i=1}^M \int_{A_i} \left(\frac{r_s}{r_a}\right)^\gamma \rho(x, y) dA} . \quad (2.34)$$

Na Equação 2.34, o ambiente de propagação é definido pelo expoente de perda de percurso (γ), e a distribuição de tráfego dada pela função $\rho(x, y)$. Uma extensão do modelo para ambientes com desvanecimento lognormal já foi desenvolvida [16] (Apêndice A), definindo F_j como

$$F_j = \frac{\int_{A_j} \rho(x, y) dA}{\sum_{i=1}^M \int_{A_i} \left(\frac{r_s}{r_a}\right)^\gamma \exp\left[\left(\frac{\sigma \ln 10}{10}\right)^2\right] \left\{1 - Q\left[\frac{10\gamma \log\left(\frac{r_a}{r_s}\right)}{\sqrt{2\sigma^2}} - \sqrt{2\sigma^2} \frac{\ln 10}{10}\right]\right\} \rho(x, y) dA}, \quad (2.35)$$

onde σ é a variância da distribuição lognormal, e a função $Q(\cdot)$ é definida como [21]

$$Q(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \quad (2.36)$$

A função $Q(\cdot)$ pode ser reescrita através da função erro complementar da seguinte forma :

$$Q(a) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{a}{\sqrt{2}}\right) & a < 0 \\ \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{a}{\sqrt{2}}\right) & a \geq 0 \end{cases}. \quad (2.37)$$

Esta abordagem facilita a implementação computacional pois a função erro complementar pode ser aproximada por [22]

$$\operatorname{erfc}(a) = \begin{cases} 2 - b & b < 0 \\ b & b \geq 0 \end{cases}, \quad (2.38)$$

onde b é dado por

$$b = c \exp(-|a|^2 - 1, 26551223 + c \times (1, 00002368 + c \times (0, 37409196 + c \times (0, 09678418 + c \times (-0, 18628806 + c \times (0, 27886807 + c \times (-1, 13520398 + c \times (1, 48851587 + c \times (-0, 82215223 + c \times 0, 17087277))))))))), \quad (2.39)$$

onde

$$c = \frac{1}{1 + \frac{|a|}{2}} . \tag{2.40}$$

No caso lognormal, o ambiente de propagação do sinal é definido pelo par de variáveis (γ, σ) . Note que a Equação 2.34 é na realidade um caso particular da Equação 2.35 quando $\sigma \rightarrow 0$, pois nesta situação, $Q(a) \rightarrow 0$.

Com uma busca de dados na literatura [16, 17, 19], montamos a Tabela 2.1 que apresenta resultados obtidos no caso de tráfego uniforme no sistema ($\rho(x, y) = \text{constante}$). Situações de tráfego não uniforme para o enlace reverso não foram encontradas, e é o objeto principal deste trabalho.

Tabela 2.1: *Valores de eficiência de reuso de freqüências (F) para diferentes ambientes de propagação (γ, σ) no enlace reverso na condição de tráfego uniforme no sistema.*

γ	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

Na Tabela 2.1, verifica-se que F varia muito sob diferentes condições de propagação, mantendo-se dentro do intervalo de 0,2 até 0,8. Uma prática comum é adotar um valor padrão de eficiência de reuso para qualquer situação [7]. Isto ocasiona um erro na predição de cobertura quando a eficiência de reuso real for diferente do padrão adotado. Para avaliar o impacto deste erro na cobertura da célula, mostraremos no Capítulo 3, um estudo desenvolvido.

2.4.2 Enlace Direto

No enlace direto, o parâmetro k_i é definido como

$$k_i = \begin{cases} \frac{(1 - \beta)P_t \alpha}{N_{max} l_0} \frac{1}{r_i^\gamma} \int_{A_i} \rho(x, y) dA & i = j \\ \frac{\beta P_t}{l_0} \frac{1}{r_i^\gamma} + \frac{(1 - \beta)P_t \alpha}{N_{max} l_0} \frac{1}{r_i^\gamma} \int_{A_i} \rho(x, y) dA & i \neq j \end{cases}, \quad (2.41)$$

onde r_i é a distância entre a unidade móvel que sofre a interferência e a estação rádio-base i (ver Figura 2.2).

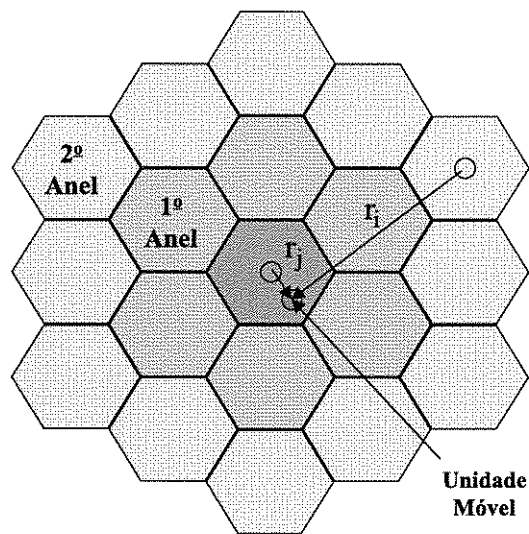


Figura 2.2: Sistema celular com dois anéis para o cálculo da eficiência de reuso de frequências no enlace direto.

Substituindo 2.41 em 2.31 chega-se à equação da eficiência de reuso para uma dada posição da unidade móvel, ou seja

$$F_j(x_{um}, y_{um}) = \frac{\int_{A_j} \rho(x, y) dA}{\int_{A_j} \rho(x, y) dA + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^M \left[\frac{\beta N_{max}}{\alpha(1-\beta)} + \int_{A_i} \rho(x, y) dA \right] \left(\frac{r_j}{r_i} \right)^\gamma}, \quad (2.42)$$

onde $F(x_{um}, y_{um})$ é a eficiência de reuso como função das variáveis de posição da unidade móvel x_{um} e y_{um} .

Analogamente ao caso do enlace reverso, um modelo para ambientes com desvanecimento lognormal pode ser obtido, e tem a seguinte forma :

$$F_j(x_{um}, y_{um}) = \frac{\int_{A_j} \rho(x, y) dA}{\int_{A_j} \rho(x, y) dA + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^M \left[\frac{\beta N_{max}}{\alpha(1-\beta)} + \int_{A_i} \rho(x, y) dA \right] \left(\frac{r_j}{r_i} \right)^\gamma} \times \exp \left[\left(\frac{\sigma \ln 10}{10} \right)^2 \right] \left\{ 1 - Q \left[\frac{10\gamma \log \left(\frac{r_i}{r_j} \right) - \sqrt{2\sigma^2} \frac{\ln 10}{10}}{\sqrt{2\sigma^2}} \right] \right\}. \quad (2.43)$$

O valor médio da eficiência de reuso deve ser obtido através de uma integração na área ou no perímetro da célula, de acordo com a conveniência da situação. As equações para cada um dos casos são as seguintes :

$$F_j = \begin{cases} \frac{1}{A_j} \int_{A_j} F_j(x_{um}, y_{um}) dA & \text{Área} \\ \frac{1}{P_j} \int_{P_j} F_j(x_{um}, y_{um}) dP & \text{Perímetro} \end{cases}, \quad (2.44)$$

onde P_j é o caminho do perímetro da célula j .

Note que o cálculo no perímetro é uma situação mais pessimista em relação à abordagem por área, pois F é certamente menor na medida em que nos afastamos da estação rádio-base.

A Tabela 2.2 apresenta resultados da literatura para diferentes ambientes obtidos com a suposição de tráfego uniforme no sistema [15, 16]. Já a Tabela 2.3 apresenta resultados para situações de tráfego não uniforme [15]. A abordagem na área foi a utilizada em todos os casos.

Tabela 2.2: Valores de F médio na área para diferentes ambientes de propagação no enlace direto na condição de tráfego uniforme no sistema.

γ	σ [dB]	F
2	8	0,4621
3	8	0,6584
4	8	0,7687
5	8	0,8283

Tabela 2.3: Valores de F médio na área no enlace direto para diferentes situações de tráfego em ambientes com desvanecimento lognormal $\gamma = 4$ e $\sigma = 8$ dB.

Célula Alvo	$\rho(x, y)$		F
	1º Anel	2º Anel	
10	50	50	0,5173
10	100	100	0,4119
50	10	10	0,9292
50	100	100	0,6649
100	10	10	0,9618
100	50	50	0,8572

Verifica-se novamente que F varia muito sob as diferentes condições impostas, sejam de propagação, sejam de tráfego. O intervalo de F fica entre 0,4 e 0,97.

2.5 Conclusões

Neste capítulo, abordamos aspectos da predição de cobertura de sistemas celulares CDMA. Desenvolvemos equações para a predição da área de cobertura para os casos de sistemas com uma célula e com múltiplas células, tanto para o enlace reverso como direto. Verificou-se que para o caso de múltiplas células, um parâmetro denominado eficiência de reuso de frequências (F) aparece nos

cálculos. A determinação deste parâmetro foi abordada na Seção 2.4 para os enlaces reverso e direto. Os trabalhos apresentados na literatura mostram que o fator F apresenta grandes variações sob diferentes condições de propagação e de tráfego. Estas variações podem gerar desvios na predição de cobertura na medida em que, geralmente, utiliza-se um valor padrão para todos os casos. Desta forma, no próximo capítulo, será apresentada uma conjectura sobre o impacto da eficiência de reuso de frequências sobre o raio de cobertura da célula.

Capítulo 3

Conjectura sobre o Impacto da Eficiência de Reuso na Cobertura CDMA

No Capítulo 2, desenvolvemos equações para o cálculo de cobertura de uma célula CDMA. No caso de sistemas com múltiplas células, necessita-se determinar o fator de eficiência de reuso de frequências, o que exige demorados processos de simulação ou integração numérica [15, 16]. Devido à dificuldade na determinação deste fator, em geral, utiliza-se um valor padrão para todas as situações [7]. Entretanto, verificamos que F varia muito sob diferentes ambientes de propagação e condições de tráfego. Desta forma, na utilização do valor padrão, considera-se um erro que será avaliado no decorrer deste capítulo.

3.1 Equação Geral para os Enlaces Reverso e Direto

As Equações 2.19 e 2.23 podem ser escritas como :

$$A l_0 r^\gamma + \frac{\mathcal{B}}{F} r^2 - \mathcal{C} = 0 , \quad (3.1)$$

onde

$$\mathcal{A} = \begin{cases} \frac{\mathcal{N}_0 W}{P_{max} \alpha} & \text{enlace reverso} \\ \frac{\mathcal{N}_0 W N_{max}}{(1 - \beta) P_t \alpha} & \text{enlace direto} \end{cases}, \quad (3.2)$$

$$\mathcal{B} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \rho \quad (3.3)$$

e

$$\mathcal{C} = \begin{cases} 1 + \frac{G_p}{(E_b/\mathcal{N}_t) \alpha} & \text{para o enlace reverso} \\ \frac{\beta N_{max}}{(E_c/\mathcal{N}_t)(1 - \beta) \alpha} & \text{para o enlace direto} \end{cases}. \quad (3.4)$$

Note que estamos considerando um tráfego uniforme dentro da célula. Note ainda que é necessário considerar tráfego uniforme apenas dentro da célula na qual tenta-se obter a cobertura. De fato, isto não é necessário em toda a região de serviço.

A Equação 3.1 tem solução analítica de r para alguns valores de γ , tais como, $\gamma = 2$, $\gamma = 3$ e $\gamma = 4$. Para cada um destes casos citados, o raio da célula vale

$$r = \sqrt{\frac{\mathcal{C}/\mathcal{A}l_0}{1 + \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{A}l_0 F}}} \quad \text{para } \gamma = 2, \quad (3.5)$$

$$r = -\frac{\mathcal{D}}{3} \left\{ 2 \cos \left[\frac{2\pi}{3} + \cos^{-1} \left(\frac{\left(\frac{27\mathcal{E}}{2\mathcal{D}^3} \right)^2 + \frac{27\mathcal{E}}{\mathcal{D}^3} + 1}{3} \right) \right] + 1 \right\} \quad \text{para } \gamma = 3, \quad (3.6)$$

onde

$$\mathcal{D} = -\frac{\mathcal{C}}{\mathcal{A}l_0}, \quad (3.7)$$

$$\mathcal{E} = -\frac{\mathcal{B}}{\mathcal{A}l_0 F}, \quad (3.8)$$

e

$$r = \sqrt{-\frac{\mathcal{B}}{2\mathcal{A}l_0F} + \sqrt{\left(\frac{\mathcal{B}}{2\mathcal{A}l_0F}\right)^2 + \frac{\mathcal{C}}{\mathcal{A}l_0}}} \quad \text{para } \gamma = 4. \quad (3.9)$$

Na próxima seção será avaliado o impacto propriamente dito para diversas situações, dentre as quais as definidas pelas Equações 3.5, 3.6 e 3.9.

3.2 Avaliando o Impacto de F sobre r

Para avaliar o impacto de F na cobertura através da Equação 3.1, temos que especificar as características do sistema para o cálculo dos coeficientes \mathcal{A} , \mathcal{B} e \mathcal{C} .

A Tabela 3.1 apresenta um conjunto de especificações [16, 23, 24, 25], e a Tabela 3.2 os coeficientes calculados.

Tabela 3.1: *Especificações para a cobertura de uma célula.*

Parâmetro	Valor
N_0W	$4,92 \times 10^{-14}$
G_p	128
E_b/N_t	5,011 (7dB)
E_c/N_t	0,032 (-15dB)
α	0,4
ρ	10 assinantes/ km^2
P_{max}	0,6 Watts
N_{max}	25 assinantes
β	0,15
P_t	5 Watts

Tabela 3.2: *Coefficientes A , B e C calculados.*

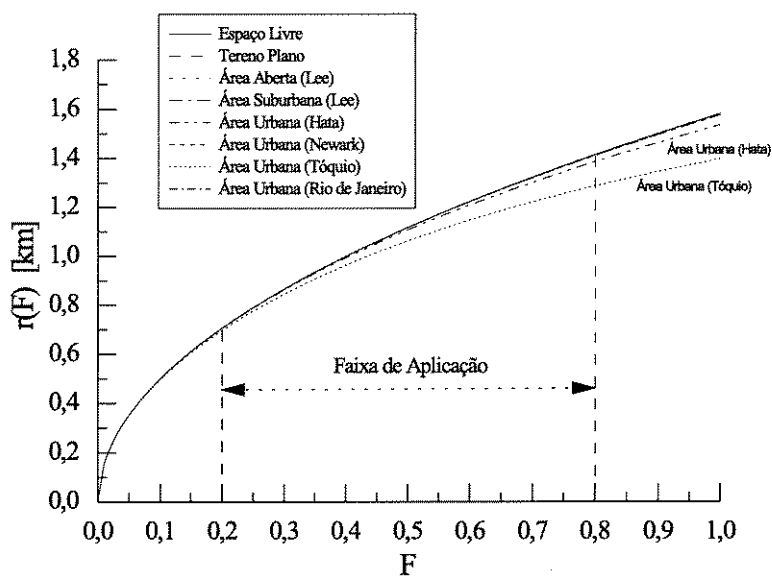
Coefficiente	Enlace Reverso	Enlace Direto
\mathcal{A}	$2,187 \times 10^{-13}$	$7,718 \times 10^{-13}$
\mathcal{B}	25,98	25,98
\mathcal{C}	69,12	367,6

Na Tabela 3.3 apresentamos valores de γ e l_0 da literatura [6, 8, 26, 27] calculados a partir dos seguintes dados :

- Frequência de operação : $f = 900$ MHz
- Altura da estação rádio-base : $h_t = 30$ m
- Altura da unidade móvel : $h_r = 1,7$ m.

Tabela 3.3: Informações de perda de percurso em diferentes ambientes.

Ambiente	γ	l_0
Espaço Livre	2,00	$10^{9,15}$
Terreno Plano	4,00	$10^{8,59}$
Área Aberta (Lee)	4,35	$10^{9,81}$
Área Suburbana (Lee)	3,84	$10^{11,6}$
Área Urbana (Modelo de Hata)	3,52	$10^{12,6}$
Área Urbana (Newark)	4,31	$10^{11,4}$
Área Urbana (Tóquio)	3,05	$10^{13,4}$
Área Urbana (Rio de Janeiro)	2,16	$10^{10,3}$

Figura 3.1: r versus F no enlace reverso em uma situação de alto tráfego (10 assinantes/ km^2) para diferentes ambientes de propagação.

Para estes ambientes de propagação, fizemos a análise do impacto de F em r , tanto para o enlace reverso como para o direto. Os resultados são apresentados nas Figuras 3.1 e 3.2 respectivamente.

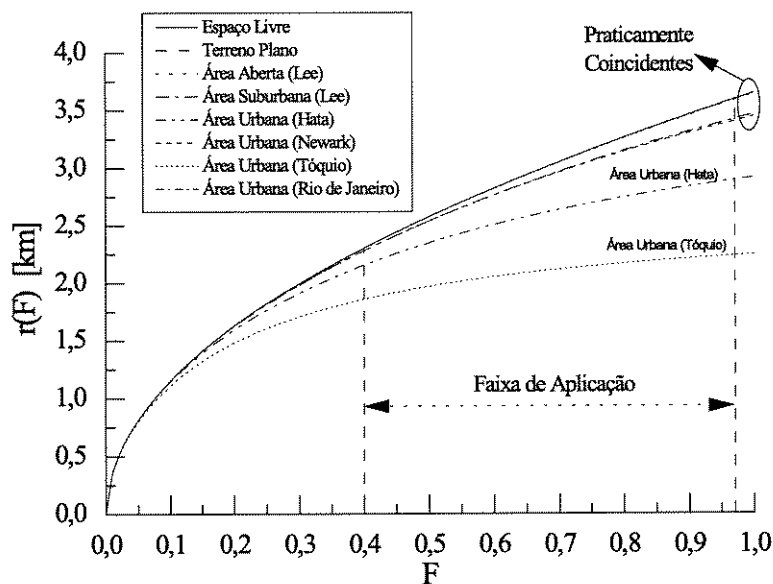


Figura 3.2: r versus F no enlace direto em uma situação de alto tráfego (10 assinantes/ km^2) para diferentes ambientes de propagação.

Note que, as curvas para espaço livre, terreno plano, área aberta, área suburbana, área urbana de Newark e área urbana do Rio de Janeiro são praticamente coincidentes. Isto ocorre porque consideramos uma densidade de tráfego alta no sistema ($\rho = 10$ assinantes/ km^2). Neste caso, a qualidade do sinal recebido é mais afetada pela interferência gerada pelos assinantes ativos e menos afetada pelas condições de desvanecimento. No caso da curva da área urbana de Hata e da área urbana de Tóquio, temos condições de desvanecimento muito fortes, que ainda influenciam na cobertura da célula apesar do alto tráfego considerado. Desta forma, estas curvas se destacam das outras nos gráficos apresentados. Entretanto, para valores maiores da densidade de tráfego, a diferença destas duas curvas em relação às demais diminui. Apenas para exemplificar, aumentamos o valor de ρ até que todas as curvas ficassem praticamente coincidentes. Para $\rho = 70$ assinantes/ km^2 , temos uma diferença máxima de 1% entre as curvas.

De fato, podemos afirmar que em uma situação de tráfego muito alto [24]

$$Al_0 r^\gamma \ll \frac{\mathcal{B}}{F} r^2 . \quad (3.10)$$

Assim, a Equação 3.1 reduz-se a

$$\frac{\mathcal{B}}{F} r^2 - C = 0 , \quad (3.11)$$

e o raio da célula vale

$$r = \sqrt{\frac{C}{\mathcal{B}} F} . \quad (3.12)$$

Portanto, para uma situação limite de alto tráfego, as características de desvanecimento não tem influência na cobertura CDMA. O que determina o raio da célula é a eficiência de reuso de frequências. É importante ressaltar que na prática, por questões econômicas, o maior interesse das operadoras de telefonia celular está justamente sobre as regiões de maior tráfego.

Em contraposto, em uma situação de tráfego baixo, as curvas se separam, pois a condição de desvanecimento torna-se proporcionalmente mais importante. Para ilustrar, traçamos as curvas das Figuras 3.3 e 3.4

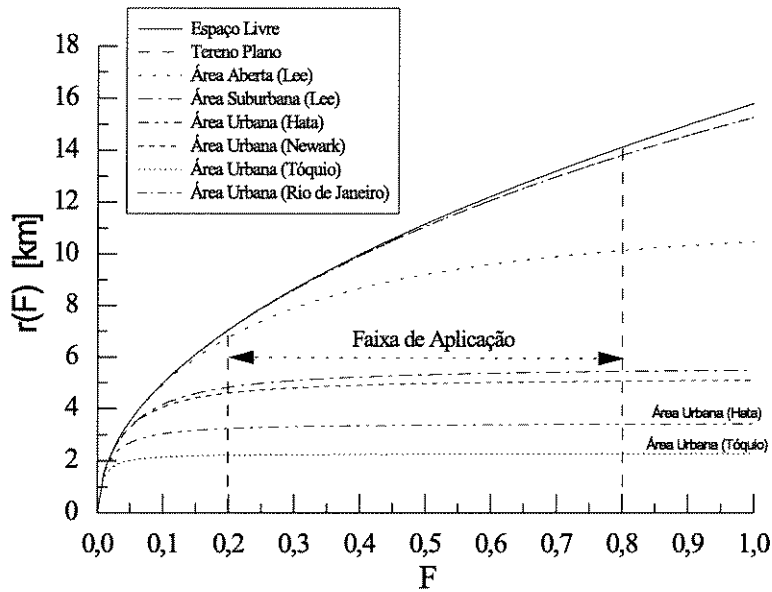


Figura 3.3: r versus F no enlace reverso - densidade de tráfego baixa ($0,1$ assinantes/ km^2).

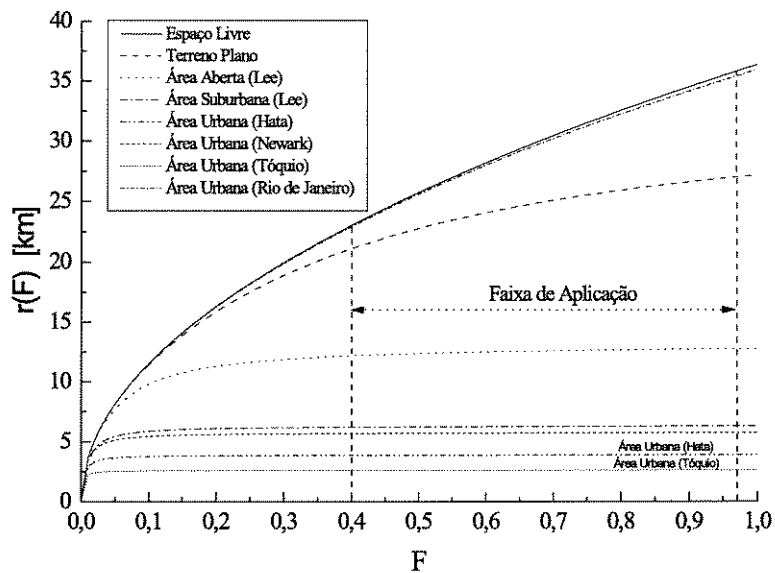


Figura 3.4: r versus F no enlace direto - densidade de tráfego baixa ($0,1$ assinantes/ km^2).

Novamente, pode-se analisar uma situação limite. Em uma condição de tráfego muito baixo, predomina a condição de propagação, ou seja

$$\frac{B}{F}r^2 \ll \mathcal{A}l_0r^\gamma . \quad (3.13)$$

Neste caso, a Equação 3.1 reduz-se a

$$\mathcal{A}l_0r^\gamma - \mathcal{C} = 0 , \quad (3.14)$$

e o raio da célula fica

$$r = \left[\frac{\mathcal{C}}{\mathcal{A}}l_0 \right]^{\frac{1}{\gamma}} . \quad (3.15)$$

Portanto, neste caso, a eficiência de reuso não tem influência na cobertura da célula.

Outro aspecto interessante é que uma abordagem comum no planejamento celular é utilizar um valor padrão para a eficiência de reuso $F = 0,66$. Neste caso, considera-se um erro associado à diferença do valor padrão com o real. Para avaliar este erro, os resultados das Figuras 3.1 e 3.2 foram utilizados para gerar as curvas das Figuras 3.5 e 3.6, onde

$$Erro(F) = Abs \left(1 - \frac{Area(0, 66)}{Area(F)} \right) \times 100 , \quad (3.16)$$

onde

$$Abs(x) = \begin{cases} x & \text{quando } x \geq 0 \\ -x & \text{quando } x < 0 \end{cases} , \quad (3.17)$$

e

$$Area(F) = \pi r^2(F) , \quad (3.18)$$

com $r(F)$ sendo o raio da célula como função de F .

Pelas curvas das Figuras 3.5 e 3.6 verifica-se que o impacto de um erro de F pode chegar a 70% da área de cobertura de uma célula dentro das faixas marcadas nos gráficos. As faixas de aplicação da eficiência de reuso foram determinadas nas Seções 2.4.1 e 2.4.2 para os enlaces reverso e direto respectivamente. Essas diferenças de área de cobertura podem resultar em erros de dimensionamento do sistema, com grandes conseqüências econômicas, o que mostra a importância de determinar a eficiência de reuso com precisão.

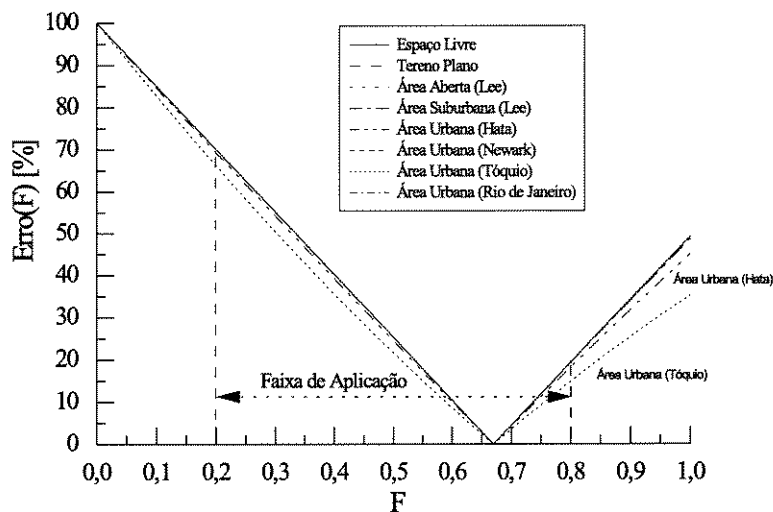


Figura 3.5: Impacto de F em r no enlace reverso - densidade de tráfego alta (10 assinantes/ km^2).

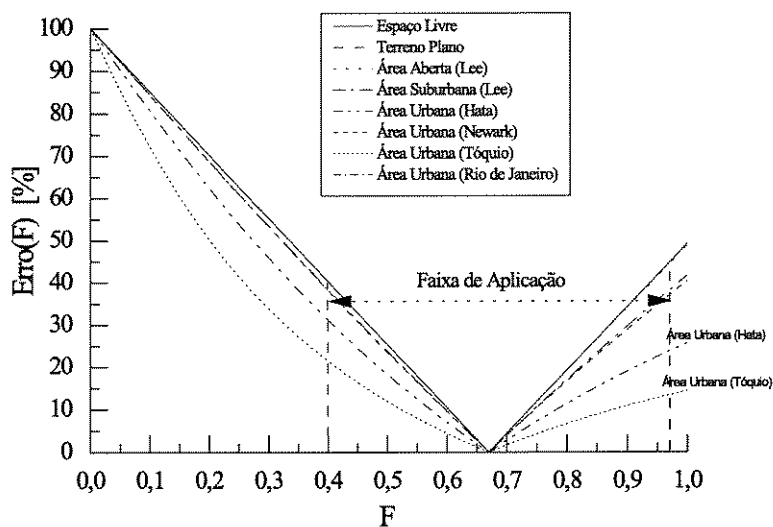


Figura 3.6: Impacto de F em r no enlace direto - densidade de tráfego alta (10 assinantes/ km^2).

3.3 Conclusões

A conjectura desenvolvida neste capítulo permitiu uma avaliação do impacto de F sobre o raio da célula. Os resultados mostram que o fator F tem grande influência sobre r em situações de tráfego alto, característica dos grandes centros urbanos, certamente os casos de maior interesse comercial. Nestes casos, grandes erros foram verificados quando utilizamos a abordagem de uma eficiência de reuso padrão para todas as situações.

Para determinar F com precisão, no Capítulo 4 será apresentado um novo método para a determinação da eficiência de reuso para perfis genéricos de tráfego no enlace reverso CDMA.

Capítulo 4

Eficiência de Reuso de Frequências do Enlace Reverso em Sistemas com Perfis Genéricos de Tráfego

No Capítulo 3, vimos que a eficiência de reuso é um fator crítico na predição de cobertura de uma célula CDMA. A precisão deste parâmetro é, portanto, muito importante para que a etapa de planejamento forneça resultados precisos.

Neste capítulo apresentaremos um novo método para o cálculo da eficiência de reuso. O método que será apresentado aplica-se ao caso do enlace reverso e para sistemas com perfis genéricos de tráfego.

4.1 Introdução

Em linhas gerais, o método é realizado com a decomposição da distribuição original de tráfego em uma soma de distribuições padrão, as quais já tiveram as eficiências de reuso determinadas. Em seguida, o parâmetro da distribuição original é escrito como uma média ponderada das eficiências de reuso de cada distribuição padrão. Em particular, como uma proposta desta tese, utilizamos as distribuições platô como padrão.

O método foi desenvolvido seguindo o fluxograma da Figura 4.1 apresentando as seguintes etapas :

- Processo de Redistribuição de Tráfego (PRT)

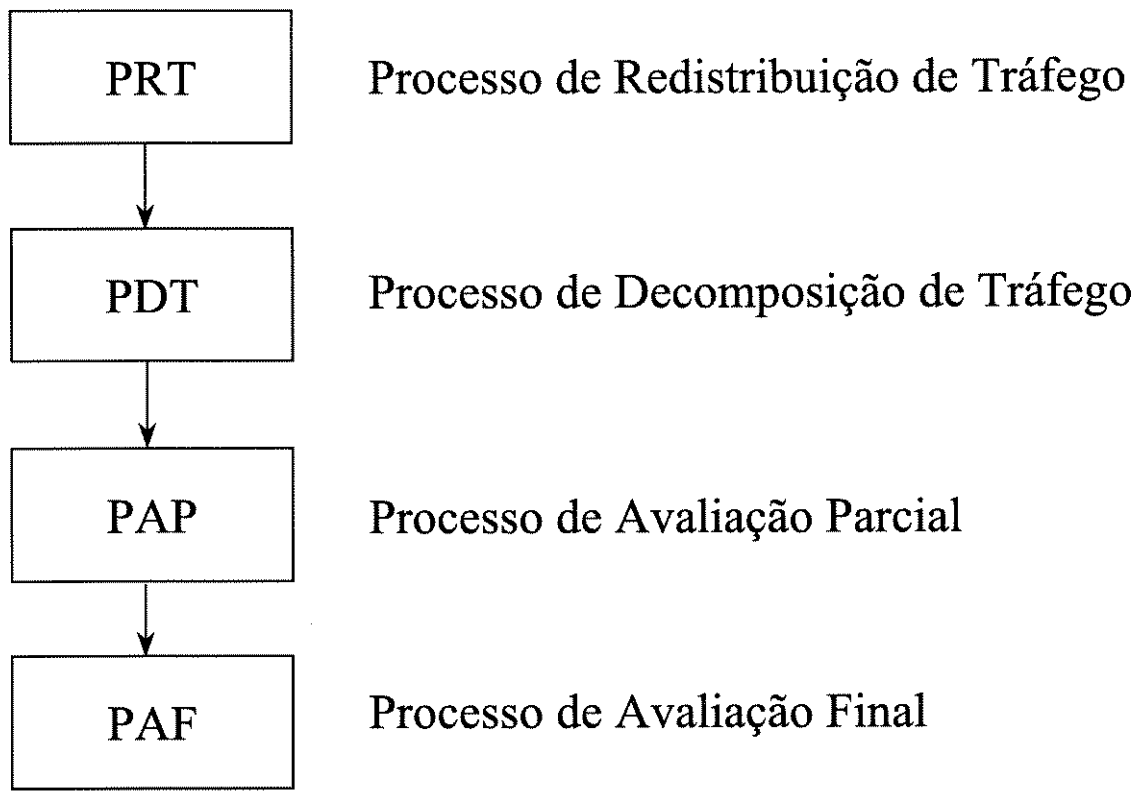


Figura 4.1: Fluxograma do novo método para o cálculo da eficiência de reuso de frequências do enlace reverso para ambientes com tráfego não uniforme.

- Processo de Decomposição de Tráfego (PDT)
- Processo de Avaliação Parcial (PAP)
- Processo de Avaliação Final (PAF)

Cada uma destas etapas, será descrita em detalhes nas seções seguintes.

4.2 Processo de Redistribuição de Tráfego (PRT)

O processo de redistribuição de tráfego é um rearranjo das células que compõem o sistema, com o objetivo de preparar o arranjo de células em um formato padrão. Para uma dada célula alvo j , o tráfego das células ao redor da célula j

em cada anel é redistribuído em torno da célula dentro do respectivo anel. Desta forma, a célula j torna-se a célula central do sistema e a soma dos tráfegos dentro de cada anel não é alterada. A Figura 4.2 ilustra o processo.

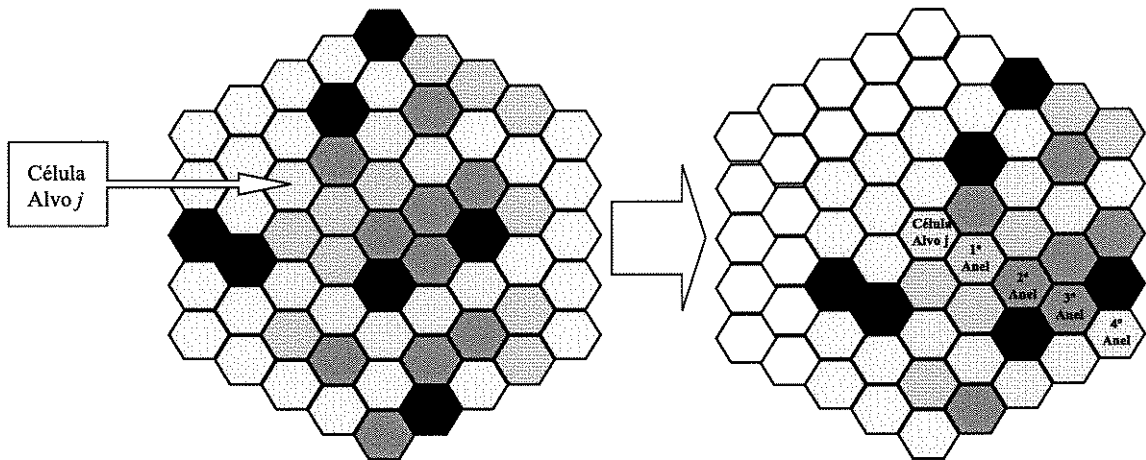


Figura 4.2: *Processo de redistribuição de tráfego. Os tons de cinza indicam uma escala de concentração de tráfego.*

4.3 Processo de Decomposição de Tráfego (PDT)

O processo de decomposição de tráfego consiste na decomposição da distribuição de tráfego original em um somatório de densidades de tráfego platô.

Considera-se que, em um sistema com M células, uma distribuição genérica de tráfego $\rho(x, y)$ pode ser escrita como

$$\rho(x, y) = \sum_{i=1}^M \rho_i \delta_i(x, y) , \tag{4.1}$$

onde ρ_i é a densidade de tráfego média da célula i e $\delta_i(x, y) = 1$ para $(x, y) \in A_i$ e $\delta_i(x, y) = 0$ nos outros casos.

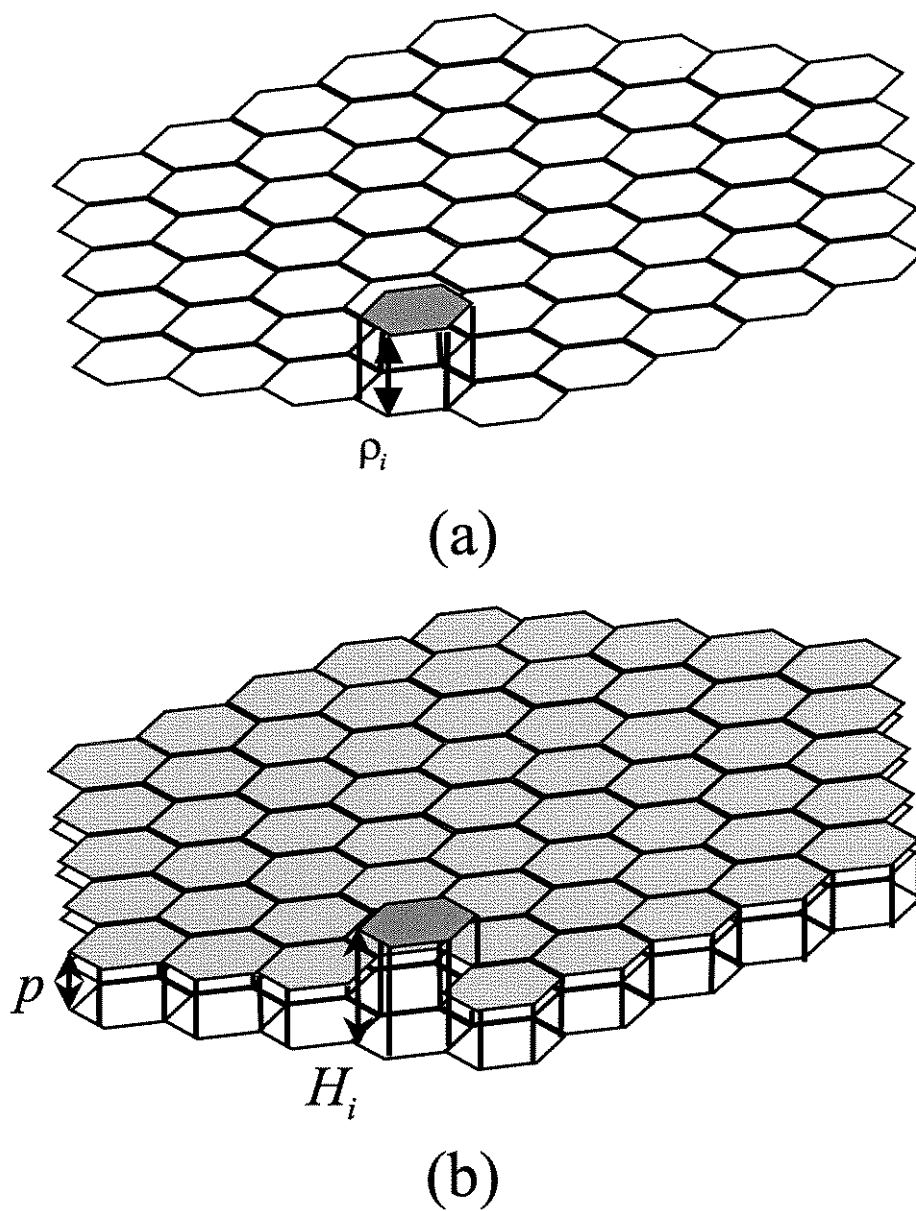


Figura 4.3: Funções do processo de decomposição de tráfego. (a) Função $\rho_i \delta_i(x, y)$. (b) Função Platô - $K_m = H_i/p$.

Define-se $\rho_{min} = \min\{\rho_i\}$, $i = 1, 2, \dots, M$, e M_{min} como o número de células com $\rho_i = \rho_{min}$. Para cada célula i onde $\rho_i \neq \rho_{min}$ define-se ainda uma densidade de tráfego platô \mathcal{P}_m (conseqüentemente, $1 \leq m \leq M - M_{min}$) de tal forma que

$$\mathcal{P}_m = H_i \delta_i(x, y) + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^M p \delta_l(x, y) , \tag{4.2}$$

onde

$$H_i = K_m p , \tag{4.3}$$

onde $K_m \geq 1$ (conseqüentemente $0 \leq 1/K_m \leq 1$) é dado por

$$K_m = 1 + \left(\frac{\rho_i}{\rho_{min}} - 1 \right) (M - M_{min}) , \tag{4.4}$$

e

$$p = \frac{\rho_{min}}{M - M_{min}} . \tag{4.5}$$

A distribuição de tráfego não uniforme original do sistema pode ser decomposta em uma soma de distribuições platô, ou seja

$$\rho(x, y) = \sum_{m=1}^{M-M_{min}} \mathcal{P}_m . \tag{4.6}$$

Através deste procedimento consegue-se uma decomposição que não apresenta qualquer aproximação. Apenas como ilustração, na Figura 4.3 temos a visualização das funções $\rho_i \delta_i(x, y)$ e \mathcal{P}_m (platô).

4.4 Processo de Avaliação Parcial (PAP)

Dada uma distribuição platô no l -ésimo anel, a eficiência de reuso da célula alvo (célula central) pode ser estimada através de uma curva previamente obtida para o l -ésimo anel. Realmente, um conjunto de curvas faz-se necessário, ou ainda, uma curva para cada anel a ser considerado nos cálculos.

Um conjunto de curvas padrão é apresentado na Figura 4.4. Note que consideramos a influência de quatro anéis [5, 15, 16]. As curvas foram obtidas tanto por simulação (Apêndice B) como por integração numérica da Equação 2.35,

para um ambiente com $\gamma = 4$ e sem desvanecimento lognormal. Como esperado, todas as curvas encontram-se em um mesmo F quando $K_m \rightarrow 1$. Este resultado corresponde ao caso de uma distribuição uniforme de tráfego, amplamente explorado na literatura, e que pode, portanto, ser utilizado para validar os dados obtidos.

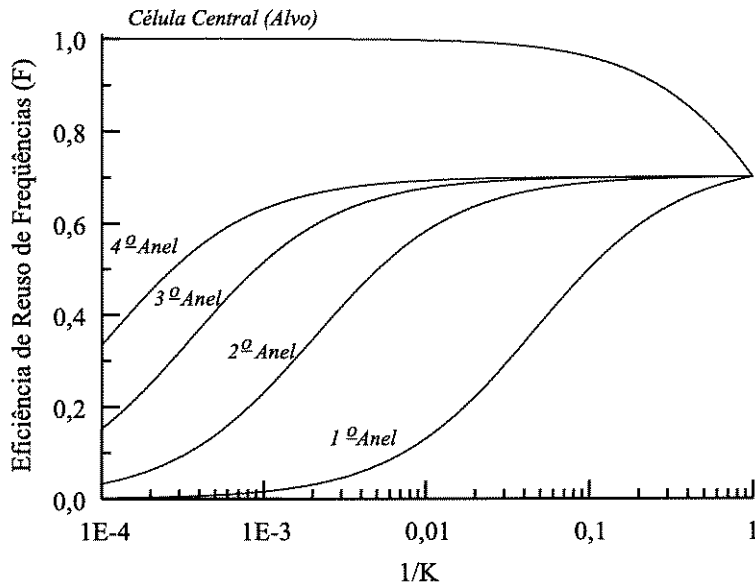


Figura 4.4: Eficiência de reuso de frequências para distribuições de tráfego platô.

Dada a razão $1/K_m$ da m -ésima distribuição platô localizada no l -ésimo anel obtemos um $F_j^{(m)}$ (onde $1 \leq m \leq M - M_{min}$) consultando as curvas da Figura 4.4. O conjunto de eficiências de reuso parciais $F_j^{(m)}$ será utilizado para calcular a eficiência de reuso total da célula j no processo de avaliação final da Seção 4.5.

4.5 Processo de Avaliação Final (PAF)

O processo de avaliação final calcula F_j a partir das eficiências de reuso parciais obtidas. Inicialmente, vamos deduzir a relação $F_j(F_j^{(m)})$, para depois executarmos a avaliação final propriamente dita.

As equações para o cálculo da eficiência de reuso de frequências foram apresentadas na Seção 2.4. Por conveniência, reproduzimos aqui a Equação 2.31 :

$$F_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^M \frac{k_i}{k_j}} \quad 1 \leq j \leq M , \quad (4.7)$$

onde, para o enlace reverso, temos que

$$k_i = \kappa \int_{A_i} \left(\frac{r_s}{r_a} \right)^\gamma \rho(x, y) dA . \quad (4.8)$$

Como vimos na Seção 4.3, a distribuição de tráfego do sistema, $\rho(x, y)$, pode ser reescrita como uma soma de funções platô (Equação 4.6).

Combinando as Equações 4.6 e 4.8 chega-se a

$$k_i = \sum_{m=1}^{M-M_{min}} k_i^{(m)} , \quad (4.9)$$

onde

$$k_i^{(m)} = \kappa \int_{A_i} \left(\frac{r_s}{r_a} \right)^\gamma \mathcal{P}_m dA . \quad (4.10)$$

Combinando as Equações 4.7 e 4.9 temos que

$$\frac{1}{F_j} = \sum_{i=1}^M \left[\frac{k_i^{(1)}}{\sum_{m=1}^{M-M_{min}} k_j^{(m)}} + \frac{k_i^{(2)}}{\sum_{m=1}^{M-M_{min}} k_j^{(m)}} + \dots + \frac{k_i^{(M-M_{min})}}{\sum_{m=1}^{M-M_{min}} k_j^{(m)}} \right] . \quad (4.11)$$

Definindo

$$w_{ab} = \frac{k_j^{(a)}}{k_j^{(b)}} , \quad (4.12)$$

temos que

$$\frac{1}{F_j} = \frac{w_1}{F_j^{(1)}} + \frac{w_2}{F_j^{(2)}} + \dots + \frac{w_{M-M_{min}}}{F_j^{(M-M_{min})}} , \quad (4.13)$$

onde $F_j^{(m)}$ é a eficiência de reuso parcial relacionada à densidade de tráfego platô \mathcal{P}_m definida como

$$F_j^{(m)} = \frac{k_j^{(m)}}{\sum_{i=1}^M k_i^{(m)}} , \tag{4.14}$$

e w_m é definido como

$$\frac{1}{w_m} = w_{1m} + w_{2m} + w_{3m} + \dots + w_{(M-M_{min})m} . \tag{4.15}$$

Finalmente, chegamos à relação $F_j(F_j^{(m)})$, onde os valores de $F_j^{(m)}$ foram obtidos em PAP, faltando, portanto, apenas calcular os pesos w_m .

Os pesos w_m podem ser obtidos através da combinação das Equações 4.10, 4.12 e 4.15, ou seja

$$w_m = \frac{\sum_{v=1}^{M-M_{min}} \int_{A_j} \mathcal{P}_v dA_j}{\int_{A_j} \mathcal{P}_m dA_j} , \tag{4.16}$$

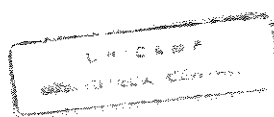
onde

$$\sum_{m=1}^{M-M_{min}} \frac{1}{w_m} = 1 . \tag{4.17}$$

Resolver a Equação 4.16 não parece simples à primeira vista, pois várias integrais precisam ser resolvidas. Entretanto, para as funções platô estas integrais são simples, resultando nas seguintes relações

$$w_m = \begin{cases} \frac{\rho_{min}}{\rho_i} \left(\frac{1}{M - M_{min}} - 1 \right) + 1 & \text{se } i = j \\ \frac{\rho_{min}}{\rho_i (M - M_{min})} & \text{se } i \neq j \end{cases} . \tag{4.18}$$

Note que a Equação 4.16 para o cálculo dos pesos w_m , a princípio, aceita qualquer função como padrão de decomposição de tráfego. Entretanto, escolhamos a classe de funções platô por possuírem as seguintes características :



- O somatório de funções platô descreve exatamente a distribuição de tráfego original da Equação 4.1.
- O processo de decomposição da função original em funções platô (PDT) é simples.
- As funções platô tem integrais do tipo $\int_{A_j} \mathcal{P}_m dA$ fáceis de resolver, o que significa simplicidade no cálculo dos pesos w_m .

De fato, qualquer classe de funções que atenda estas características poderia ser utilizada para criar um novo método.

4.6 Exemplo

Como exemplo de aplicação do método, utilizamos o sistema da Figura 4.5 onde os números fora de parêntesis em cada célula correspondem à densidade de tráfego daquela célula.

Neste sistema, temos $M = 61$, $M_{min} = 14$, e $\rho_{min} = 5$. Obtém-se 47 funções platô no PDT. A aplicação do método resulta na eficiência de reuso de cada célula do sistema, que são mostrados entre parêntesis na Figura 4.5.

Pelo novo método proposto, as eficiências de reuso das 61 células do sistema foram calculadas quase que instantaneamente. Procedimentos tradicionais como simulação e integração numérica levariam várias horas para obter os mesmos resultados.

4.7 Conclusões

Neste capítulo apresentamos um novo método para o cálculo da eficiência de reuso de frequências do enlace reverso em sistemas com perfis genéricos de tráfego. O método proposto proporciona resultados precisos de forma instantânea quando comparado à abordagens como simulação [15] e integração numérica [16]. O método faz uso de curvas padrão como as da Figura 4.4. Outras curvas padrão podem ser obtidas para diferentes condições de propagação (diferentes valores de γ , inclusão de desvanecimento lognormal, etc). No Capítulo 5, abordaremos justamente a obtenção de curvas padrão para ambientes com desvanecimento lognormal.

Os resultados deste capítulo levaram à publicação de um artigo em revista internacional (referência [28]).

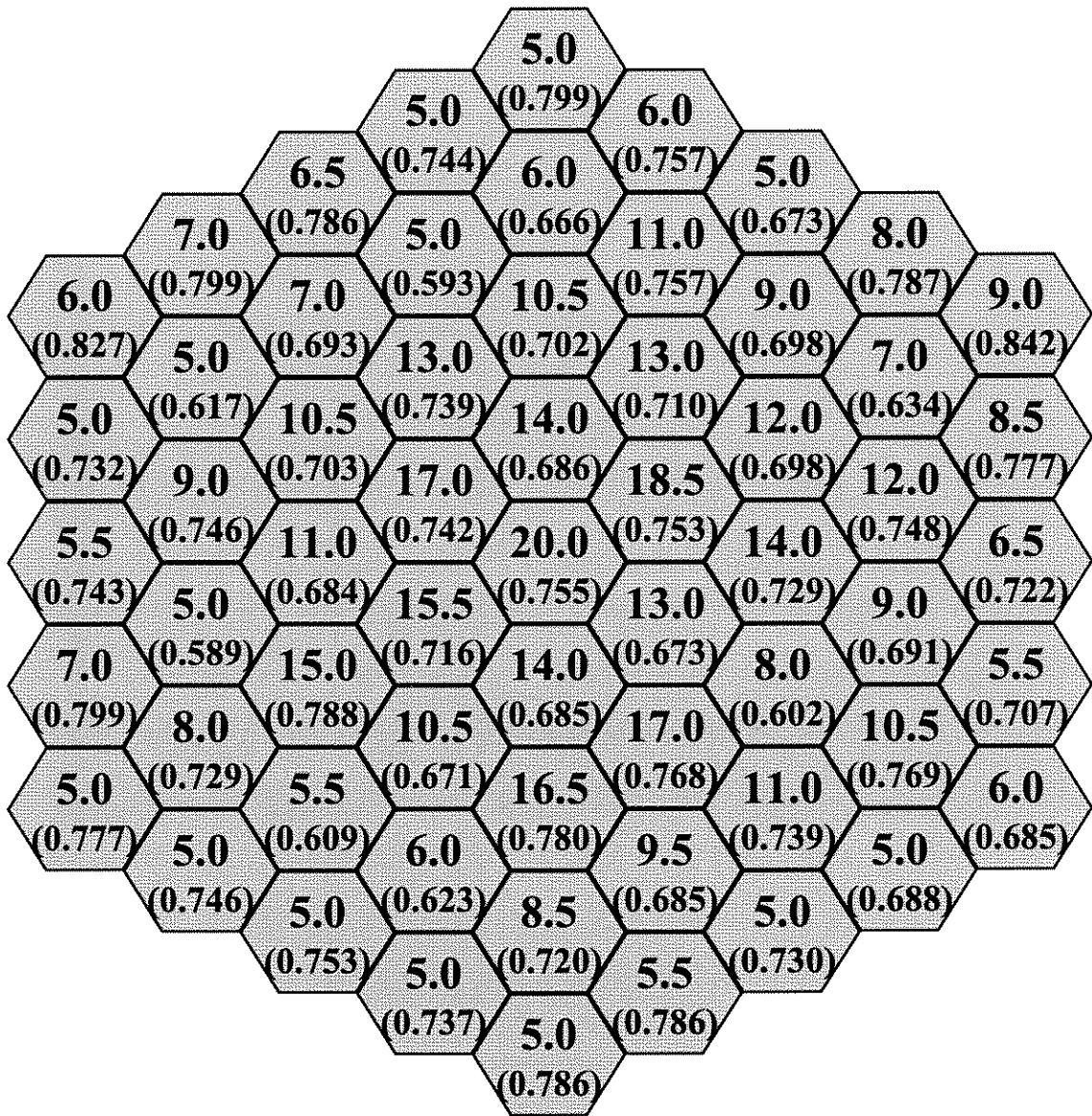


Figura 4.5: Exemplo da aplicação do método em um sistema com tráfego não uniforme.

Capítulo 5

Curvas Padrão para Ambientes com Desvanecimento Lognormal

O objetivo deste capítulo é estender o método apresentado no Capítulo 4 para situações onde o ambiente apresenta desvanecimento lognormal [6]. Para isto, necessitamos levantar as curvas padrão utilizadas no processo de avaliação parcial (PAP). Este levantamento é feito através da solução da Equação 2.35, a qual, por conveniência, será reproduzida aqui :

$$F_j = \frac{\int_{A_j} \rho(x, y) dA}{\sum_{i=1}^M \int_{A_i} \left(\frac{r_s}{r_a}\right)^\gamma \exp\left[\left(\frac{\sigma \ln 10}{10}\right)^2\right] \left\{ 1 - Q\left[\frac{10\gamma \log\left(\frac{r_a}{r_s}\right)}{\sqrt{2\sigma^2}} - \sqrt{2\sigma^2} \frac{\ln 10}{10}\right]\right\} \rho(x, y) dA} \quad (5.1)$$

Pela Equação 5.1, notamos que um ambiente lognormal pode ser definido pela dupla de variáveis (γ, σ) . Portanto, devemos variar estes parâmetros, para encontrar um conjunto de curvas padrão para cada caso. Com base em informações sobre γ e σ da literatura [29, 30, 31, 32], decidimos trabalhar nas seguintes faixas :

- γ variando de 2,0 até 5,0 com passos de 0,5.
- σ variando de 1,0 até 10,0 dB com passos de 0,5.

Trabalhando com estes valores, chegaríamos a 133 conjuntos de curvas padrão. Um número grande de curvas, mas de forma alguma impraticável. Entretanto, em face deste problema, buscamos uma alternativa para representar estas curvas de forma mais compacta. Esta forma de representação será detalhada na Seção 5.1.

Na Seção 5.2 serão apresentados os dados obtidos para os vários ambientes com desvanecimento lognormal.

5.1 Equação Geral Para as Curvas Padrão

Como visto na Equação 2.31, a eficiência de reuso de frequências para uma dada célula j é dada por

$$F_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^M \frac{k_i}{k_j}} \quad 1 \leq j \leq M . \quad (5.2)$$

Esta é uma fórmula geral para o cálculo da eficiência de reuso e que, certamente, também pode ser utilizada para o cálculo das eficiências de reuso parciais, relacionadas com as distribuições platô de tráfego. Em particular, para o caso de um tráfego descrito por um somatório de funções platô, temos duas situações distintas :

- (a) Maior tráfego localizado na célula j .
- (b) Maior tráfego localizado na célula u onde $u \neq j$.

No caso (a), podemos reescrever a Equação 5.2 como

$$F_j = \frac{K_m}{A + BK_m} , \quad (5.3)$$

onde K_m foi definido na Equação 4.4, e os coeficientes A e B valem :

$$A = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^M \frac{k_i}{k_j} , \quad (5.4)$$

$$B = 1 , \quad (5.5)$$

onde k_i é a interferência gerada pela célula i que tem densidade de tráfego p (Equação 4.5), sobre a célula j .

Da mesma forma no caso (b), podemos reescrever a Equação 5.2 como

$$F_j = \frac{1}{A + BK_m}, \quad (5.6)$$

onde os coeficientes A e B são definidos como :

$$A = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq u}}^M \frac{k_i}{k_j}, \quad (5.7)$$

$$B = \frac{k_u}{k_j}. \quad (5.8)$$

As Equações 5.3 e 5.6 mostram que basta determinar A e B para cada anel que o conjunto de curvas estará definido. Como estamos considerando a interferência gerada por quatro anéis [5, 15, 16], cinco valores da dupla $[A, B]$ serão necessários e suficientes para representar um conjunto de curvas padrão.

Como exemplo desta prática, consideramos as curvas da Figura 4.4, utilizada no Capítulo 4, obtendo os coeficientes da Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Coeficientes $[A, B]$ relativos às curvas padrão da Figura 4.4.

Anel(l)	A	B
0	0,4295	1
1	1,3660	0,063537
2	1,4266	0,002936
3	1,4290	0,000516
4	1,4294	0,000157

5.2 Coeficientes para Desvanecimento Lognormal

Com a representação das curvas padrão através de coeficientes, nesta seção calculamos A e B para diferentes valores de γ e σ , com o uso de métodos numéricos. As Tabelas de 5.2 a 5.8 apresentam os resultados obtidos.

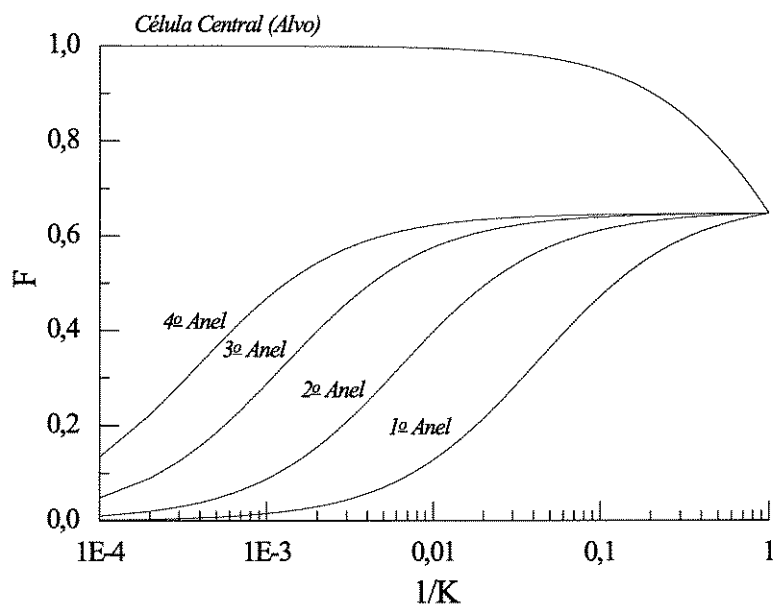


Figura 5.1: Curvas padrão para um ambiente com $\gamma = 4,0$ e $\sigma = 5,0$ dB.

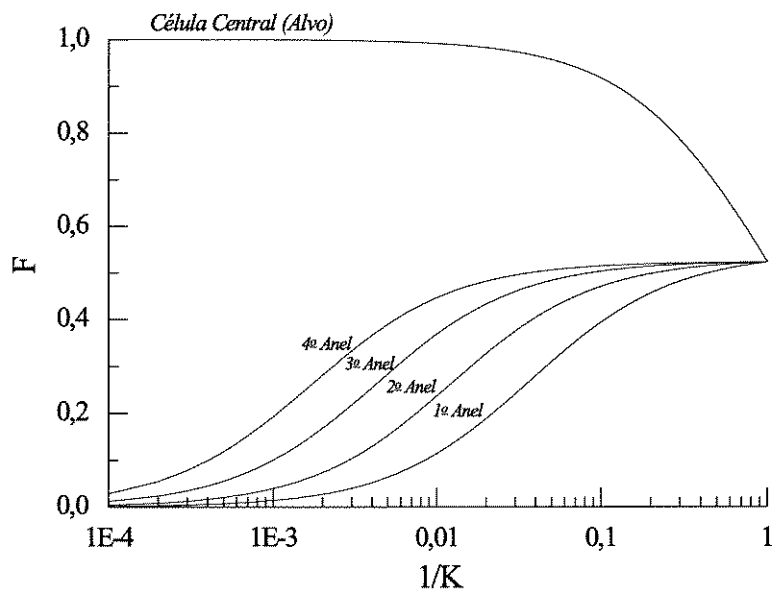


Figura 5.2: Curvas padrão para um ambiente com $\gamma = 4,0$ e $\sigma = 8,0$ dB.

A partir dos coeficientes tabelados, fica fácil obter as curvas padrão necessárias para a aplicação do método do Capítulo 4. Para ilustrar, nas Figuras 5.1 e 5.2, apresentamos os conjuntos de curvas para $[\gamma = 4,0, \sigma = 5,0 \text{ dB}]$ e $[\gamma = 4,0, \sigma = 8,0 \text{ dB}]$ respectivamente.

Comparando os resultados das Figuras 5.1 e 5.2, com os da Figura 4.4, nota-se que quanto maior σ , os anéis mais afastados geram maior interferência na célula alvo. Esta tendência também é verificada quando diminuimos o valor de γ , mantendo σ constante. Esta influência de γ nas curvas padrão pode ser constatada através das Figuras 5.3 e 5.4. Estes resultados eram esperados e confirmam outras publicações da literatura [16, 15].

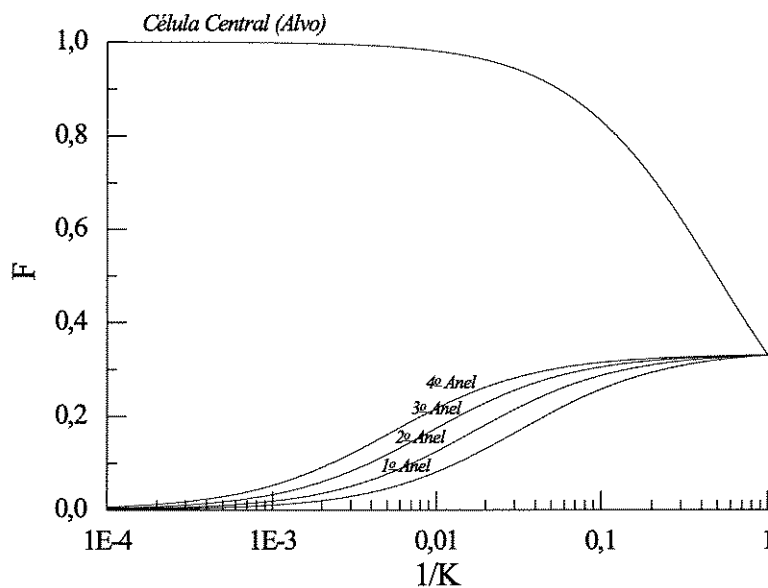


Figura 5.3: Curvas padrão para um ambiente com $\gamma = 3,0$ e $\sigma = 8,0 \text{ dB}$.

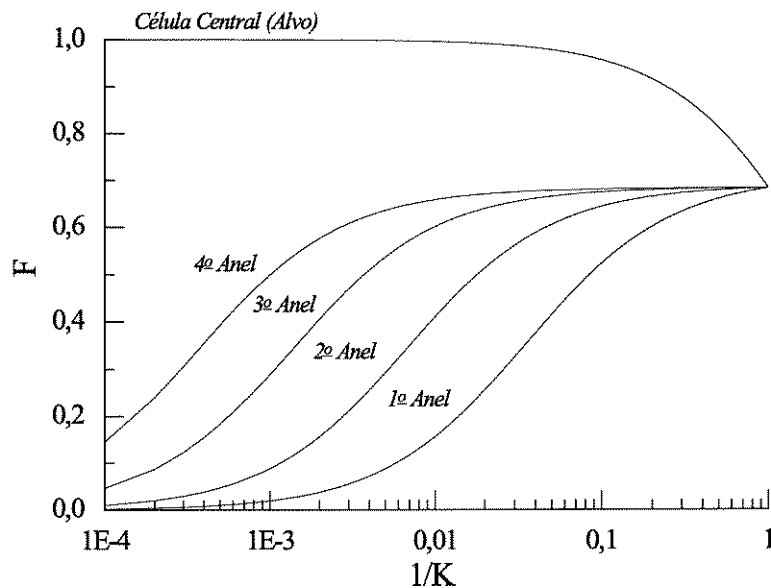


Figura 5.4: Curvas padrão para um ambiente com $\gamma = 5,0$ e $\sigma = 8,0$ dB.

5.3 Exemplo

Para exemplificar o cálculo de F em ambientes com desvanecimento lognormal, utilizamos o mesmo sistema da Seção 4.6. Calculamos o valor de F para todas as células do sistema para um ambiente com $\gamma = 3,0$ e $\sigma = 8$ dB. Os resultados estão na Figura 5.5. Decidiu-se por este ambiente de propagação por proporcionar grandes variações no valor de F quando comparado aos resultados da Figura 4.5. O método mostrou-se rápido com os novos dados, gerando os resultados instantaneamente.

5.4 Conclusões

Neste capítulo apresentamos resultados que ampliam a faixa de aplicação do método proposto no Capítulo 4 para situações com desvanecimento lognormal.

As curvas padrão foram representadas através dos coeficientes das Equações 5.3 e 5.6, uma forma mais compacta de representação. Calculamos esses coeficientes para vários ambientes de propagação na Seção 5.2.

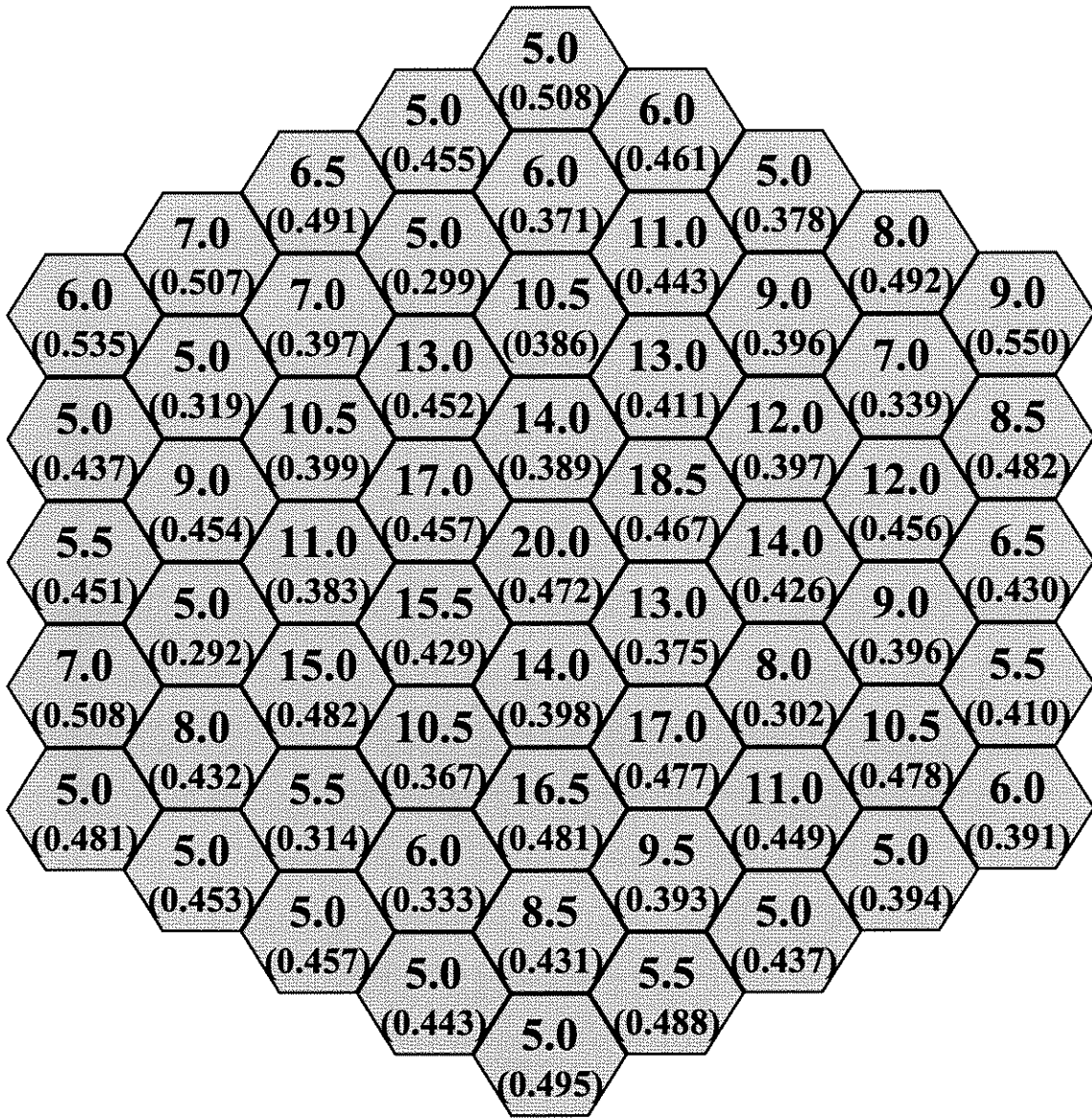


Figura 5.5: Cálculo da eficiência de reuso para um ambiente com $\gamma = 4,0$ e $\sigma = 8$ dB.

Tabela 5.2: Coeficientes $[A, B]$ relativos às curvas padrão de ambientes com $\gamma = 2,0$ e desvanecimento lognormal σ .

σ	Célula Central		1º Anel		2º Anel		3º Anel		4º Anel	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0.0	2.1325	1.0	2.9616	0.170861	3.0896	0.042909	3.1136	0.018841	3.1219	0.010553
1.0	2.1516	1.0	2.9876	0.163959	3.1063	0.045253	3.1317	0.019870	3.1404	0.011129
1.5	2.2299	1.0	3.0662	0.163701	3.1816	0.048346	3.2087	0.021230	3.2180	0.011892
2.0	2.3554	1.0	3.1908	0.164595	3.3024	0.052943	3.3321	0.023295	3.3423	0.013048
2.5	2.5250	1.0	3.3595	0.165445	3.4660	0.058941	3.4987	0.026233	3.5103	0.014700
3.0	2.7327	1.0	3.5675	0.165220	3.6669	0.065821	3.7025	0.030202	3.7157	0.016995
3.5	2.9692	1.0	3.8056	0.163574	3.8964	0.072786	3.9341	0.035150	3.9491	0.020068
4.0	3.2211	1.0	4.0605	0.160572	4.1419	0.079134	4.1803	0.040758	4.1971	0.023933
4.5	3.4724	1.0	4.3159	0.156578	4.3880	0.084421	4.4259	0.046550	4.4440	0.028418
5.0	3.7083	1.0	4.5564	0.151891	4.6198	0.088487	4.6562	0.052092	4.6751	0.033227
5.5	3.9178	1.0	4.7709	0.146844	4.8264	0.091357	4.8607	0.057077	4.8797	0.038043
6.0	4.0943	1.0	4.9527	0.141610	5.0012	0.093157	5.0330	0.061340	5.0517	0.042610
6.5	4.2359	1.0	5.0996	0.136385	5.1419	0.094059	5.1711	0.064828	5.1892	0.046751
7.0	4.3431	1.0	5.2119	0.131232	5.2489	0.094226	5.2755	0.067563	5.2927	0.050369
7.5	4.4187	1.0	5.2924	0.126256	5.3249	0.093822	5.3491	0.069608	5.3653	0.053432
8.0	4.4659	1.0	5.3445	0.121459	5.3729	0.092969	5.3949	0.071044	5.4100	0.055948
8.5	4.4890	1.0	5.3721	0.116897	5.3972	0.091788	5.4170	0.071961	5.4310	0.057952
9.0	4.4913	1.0	5.3788	0.112546	5.4010	0.090358	5.4189	0.072439	5.4318	0.059493
9.5	4.4768	1.0	5.3684	0.108438	5.3881	0.088759	5.4043	0.072559	5.4162	0.060626
10.0	4.4482	1.0	5.3437	0.104539	5.3612	0.087037	5.3759	0.072382	5.3868	0.061404

Tabela 5.3: Coeficientes $[A, B]$ relativos às curvas padrão de ambientes com $\gamma = 2, 5$ e desvanecimento lognormal σ .

σ	Célula Central		1º Anel		2º Anel		3º Anel		4º Anel	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0.0	1.2292	1.0	2.1036	0.125628	2.2080	0.021199	2.2217	0.007473	2.2256	0.003604
1.0	1.2201	1.0	2.1003	0.119772	2.1978	0.022361	2.2122	0.007883	2.2163	0.003802
1.5	1.2512	1.0	2.1320	0.119231	2.2273	0.023893	2.2428	0.008423	2.2472	0.004063
2.0	1.3076	1.0	2.1877	0.119968	2.2814	0.026206	2.2984	0.009242	2.3032	0.004458
2.5	1.3899	1.0	2.2684	0.121485	2.3605	0.029420	2.3795	0.010413	2.3849	0.005022
3.0	1.4975	1.0	2.3743	0.123149	2.4639	0.033533	2.4854	0.012040	2.4917	0.005811
3.5	1.6285	1.0	2.5041	0.124393	2.5902	0.038355	2.6143	0.014240	2.6216	0.006899
4.0	1.7803	1.0	2.6554	0.124884	2.7368	0.043551	2.7632	0.017071	2.7719	0.008380
4.5	1.9485	1.0	2.8240	0.124528	2.8998	0.048741	2.9280	0.020480	2.9382	0.010326
5.0	2.1270	1.0	3.0036	0.123393	3.0734	0.053607	3.1027	0.024305	3.1143	0.012746
5.5	2.3087	1.0	3.1871	0.121615	3.2508	0.057933	3.2804	0.028333	3.2931	0.015576
6.0	2.4864	1.0	3.3670	0.119348	3.4247	0.061609	3.4540	0.032350	3.4677	0.018694
6.5	2.6540	1.0	3.5372	0.116733	3.5894	0.064607	3.6178	0.036184	3.6320	0.021957
7.0	2.8071	1.0	3.6932	0.113889	3.7401	0.066951	3.7674	0.039715	3.7819	0.025228
7.5	2.9429	1.0	3.8320	0.110909	3.8742	0.068698	3.9001	0.042871	3.9145	0.028393
8.0	3.0601	1.0	3.9523	0.107866	3.9902	0.069918	4.0145	0.045619	4.0288	0.031367
8.5	3.1586	1.0	4.0538	0.104813	4.0879	0.070684	4.1106	0.047958	4.1245	0.034094
9.0	3.2389	1.0	4.1371	0.101790	4.1678	0.071067	4.1890	0.049904	4.2024	0.036545
9.5	3.3022	1.0	4.2034	0.098824	4.2311	0.071132	4.2507	0.051484	4.2635	0.038707
10.0	3.3500	1.0	4.2541	0.095935	4.2791	0.070935	4.2973	0.052732	4.3094	0.040583

Tabela 5.4: Coeficientes $[A, B]$ relativos às curvas padrão de ambientes com $\gamma = 3,0$ e desvanecimento lognormal σ .

σ	Célula Central		1º Anel		2º Anel		3º Anel		4º Anel	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0.0	0.7926	1.0	1.6961	0.096563	1.7819	0.010737	1.7896	0.003020	1.7914	0.001252
1.0	0.7728	1.0	1.6815	0.091320	1.7615	0.011324	1.7696	0.003185	1.7715	0.001320
1.5	0.7832	1.0	1.6927	0.090482	1.7711	0.012098	1.7798	0.003403	1.7818	0.001410
2.0	0.8078	1.0	1.7171	0.090690	1.7945	0.013275	1.8041	0.003734	1.8062	0.001548
2.5	0.8473	1.0	1.7555	0.091738	1.8323	0.014938	1.8430	0.004207	1.8455	0.001743
3.0	0.9022	1.0	1.8089	0.093338	1.8850	0.017180	1.8974	0.004867	1.9002	0.002017
3.5	0.9724	1.0	1.8773	0.095128	1.9524	0.020012	1.9666	0.005778	1.9700	0.002396
4.0	1.0575	1.0	1.9608	0.096767	2.0342	0.023377	2.0505	0.007015	2.0546	0.002922
4.5	1.1566	1.0	2.0585	0.098025	2.1294	0.027115	2.1479	0.008639	2.1529	0.003647
5.0	1.2682	1.0	2.1694	0.098763	2.2372	0.031042	2.2575	0.010671	2.2636	0.004627
5.5	1.3901	1.0	2.2912	0.098976	2.3552	0.034953	2.3771	0.013068	2.3842	0.005900
6.0	1.5193	1.0	2.4206	0.098678	2.4806	0.038691	2.5036	0.015751	2.5118	0.007477
6.5	1.6521	1.0	2.5541	0.097960	2.6100	0.042130	2.6335	0.018604	2.6428	0.009329
7.0	1.7848	1.0	2.6879	0.096876	2.7396	0.045204	2.7632	0.021520	2.7734	0.011404
7.5	1.9139	1.0	2.8184	0.095524	2.8660	0.047875	2.8895	0.024395	2.9003	0.013631
8.0	2.0366	1.0	2.9427	0.093947	2.9865	0.050141	3.0095	0.027153	3.0207	0.015938
8.5	2.1509	1.0	3.0587	0.092229	3.0989	0.052017	3.1212	0.029734	3.1327	0.018255
9.0	2.2552	1.0	3.1648	0.090392	3.2017	0.053528	3.2231	0.032104	3.2347	0.020526
9.5	2.3488	1.0	3.2603	0.088501	3.2941	0.054711	3.3145	0.034240	3.3261	0.022705
10.0	2.4312	1.0	3.3447	0.086560	3.3756	0.055597	3.3951	0.036138	3.4065	0.024760

Tabela 5.5: Coeficientes $[A, B]$ relativos às curvas padrão de ambientes com $\gamma = 3, 5$ e desvanecimento lognormal σ .

σ	Célula Central		1º Anel		2º Anel		3º Anel		4º Anel	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0.0	0.5617	1.0	1.4847	0.077029	1.5562	0.005556	1.5605	0.001239	1.5613	0.000440
1.0	0.5390	1.0	1.4667	0.072332	1.5331	0.005860	1.5377	0.001307	1.5385	0.000465
1.5	0.5401	1.0	1.4688	0.071325	1.5339	0.006262	1.5387	0.001397	1.5396	0.000496
2.0	0.5498	1.0	1.4787	0.071112	1.5429	0.006870	1.5482	0.001532	1.5492	0.000545
2.5	0.5684	1.0	1.4967	0.071616	1.5606	0.007739	1.5666	0.001727	1.5677	0.000614
3.0	0.5964	1.0	1.5237	0.072704	1.5875	0.008931	1.5944	0.001997	1.5957	0.000710
3.5	0.6342	1.0	1.5600	0.074191	1.6237	0.010506	1.6318	0.002373	1.6333	0.000843
4.0	0.6818	1.0	1.6059	0.075862	1.6693	0.012489	1.6789	0.002892	1.6808	0.001029
4.5	0.7391	1.0	1.6616	0.077507	1.7242	0.014858	1.7355	0.003602	1.7378	0.001288
5.0	0.8058	1.0	1.7269	0.078958	1.7883	0.017546	1.8013	0.004551	1.8042	0.001651
5.5	0.8816	1.0	1.8015	0.080107	1.8611	0.020453	1.8758	0.005769	1.8794	0.002153
6.0	0.9655	1.0	1.8846	0.080904	1.9420	0.023464	1.9582	0.007260	1.9627	0.002827
6.5	1.0563	1.0	1.9750	0.081341	2.0299	0.026469	2.0473	0.008998	2.0526	0.003696
7.0	1.1524	1.0	2.0710	0.081440	2.1230	0.029375	2.1415	0.010936	2.1476	0.004768
7.5	1.2517	1.0	2.1705	0.081235	2.2196	0.032111	2.2387	0.013013	2.2457	0.006030
8.0	1.3521	1.0	2.2714	0.080770	2.3175	0.034628	2.3370	0.015166	2.3447	0.007458
8.5	1.4517	1.0	2.3716	0.080087	2.4148	0.036900	2.4343	0.017334	2.4427	0.009015
9.0	1.5486	1.0	2.4693	0.079228	2.5097	0.038912	2.5291	0.019466	2.5379	0.010661
9.5	1.6413	1.0	2.5631	0.078227	2.6007	0.040667	2.6198	0.021522	2.6290	0.012357
10.0	1.7288	1.0	2.6516	0.077117	2.6866	0.042172	2.7053	0.023470	2.7147	0.014064

Tabela 5.6: Coeficientes $[A, B]$ relativos às curvas padrão de ambientes com $\gamma = 4,0$ e desvanecimento lognormal σ .

σ	Célula Central		1º Anel		2º Anel		3º Anel		4º Anel	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0.0	0.4295	1.0	1.3660	0.063537	1.4266	0.002936	1.4290	0.000516	1.4293	0.000157
1.0	0.4063	1.0	1.3471	0.059231	1.4032	0.003096	1.4058	0.000544	1.4061	0.000165
1.5	0.4032	1.0	1.3451	0.058132	1.3999	0.003307	1.4026	0.000581	1.4030	0.000177
2.0	0.4057	1.0	1.3480	0.057664	1.4021	0.003630	1.4050	0.000638	1.4055	0.000194
2.5	0.4137	1.0	1.3560	0.057747	1.4096	0.004088	1.4130	0.000719	1.4135	0.000219
3.0	0.4279	1.0	1.3695	0.058352	1.4231	0.004727	1.4270	0.000832	1.4276	0.000253
3.5	0.4482	1.0	1.3889	0.059364	1.4426	0.005587	1.4472	0.000988	1.4479	0.000300
4.0	0.4752	1.0	1.4145	0.060683	1.4685	0.006715	1.4740	0.001205	1.4748	0.000367
4.5	0.5086	1.0	1.4465	0.062160	1.5005	0.008126	1.5071	0.001507	1.5082	0.000459
5.0	0.5487	1.0	1.4851	0.063668	1.5389	0.009826	1.5468	0.001925	1.5481	0.000590
5.5	0.5953	1.0	1.5302	0.065085	1.5835	0.011775	1.5928	0.002492	1.5945	0.000776
6.0	0.6483	1.0	1.5820	0.066327	1.6344	0.013930	1.6451	0.003235	1.6473	0.001039
6.5	0.7074	1.0	1.6400	0.067345	1.6911	0.016216	1.7032	0.004169	1.7059	0.001402
7.0	0.7721	1.0	1.7040	0.068109	1.7535	0.018573	1.7668	0.005294	1.7702	0.001886
7.5	0.8416	1.0	1.7730	0.068627	1.8207	0.020926	1.8350	0.006592	1.8391	0.002504
8.0	0.9150	1.0	1.8461	0.068898	1.8918	0.023225	1.9070	0.008036	1.9118	0.003262
8.5	0.9911	1.0	1.9222	0.068957	1.9657	0.025420	1.9815	0.009589	1.9870	0.004156
9.0	1.0687	1.0	1.9999	0.068814	2.0412	0.027482	2.0575	0.011215	2.0635	0.005172
9.5	1.1464	1.0	2.0779	0.068511	2.1170	0.029386	2.1335	0.012873	2.1401	0.006292
10.0	1.2232	1.0	2.1552	0.068056	2.1921	0.031122	2.2087	0.014534	2.2157	0.007493

Tabela 5.7: Coeficientes $[A, B]$ relativos às curvas padrão de ambientes com $\gamma = 4, 5$ e desvanecimento lognormal σ .

σ	Célula Central		1º Anel		2º Anel		3º Anel		4º Anel	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0.0	0.3468	1.0	1.2930	0.053766	1.3452	0.001579	1.3466	0.000217	1.3468	0.000056
1.0	0.3247	1.0	1.2748	0.049855	1.3230	0.001666	1.3244	0.000229	1.3246	0.000060
1.5	0.3198	1.0	1.2710	0.048744	1.3180	0.001780	1.3195	0.000245	1.3197	0.000064
2.0	0.3187	1.0	1.2705	0.048118	1.3167	0.001953	1.3184	0.000269	1.3186	0.000070
2.5	0.3214	1.0	1.2734	0.047937	1.3192	0.002200	1.3211	0.000303	1.3213	0.000079
3.0	0.3281	1.0	1.2799	0.048171	1.3255	0.002545	1.3277	0.000351	1.3280	0.000091
3.5	0.3389	1.0	1.2902	0.048776	1.3359	0.003016	1.3385	0.000416	1.3388	0.000108
4.0	0.3542	1.0	1.3045	0.049690	1.3506	0.003648	1.3537	0.000508	1.3541	0.000132
4.5	0.3740	1.0	1.3232	0.050832	1.3696	0.004468	1.3734	0.000636	1.3739	0.000165
5.0	0.3984	1.0	1.3463	0.052115	1.3929	0.005497	1.3976	0.000816	1.3982	0.000213
5.5	0.4275	1.0	1.3740	0.053447	1.4207	0.006736	1.4264	0.001069	1.4272	0.000281
6.0	0.4611	1.0	1.4064	0.054746	1.4530	0.008173	1.4597	0.001416	1.4608	0.000379
6.5	0.4994	1.0	1.4434	0.055948	1.4896	0.009782	1.4975	0.001879	1.4989	0.000520
7.0	0.5421	1.0	1.4851	0.057006	1.5306	0.011525	1.5397	0.002473	1.5414	0.000720
7.5	0.5892	1.0	1.5313	0.057894	1.5759	0.013357	1.5860	0.003207	1.5882	0.000993
8.0	0.6403	1.0	1.5817	0.058599	1.6251	0.015235	1.6362	0.004078	1.6389	0.001353
8.5	0.6949	1.0	1.6358	0.059122	1.6778	0.017116	1.6898	0.005075	1.6931	0.001810
9.0	0.7524	1.0	1.6929	0.059469	1.7335	0.018964	1.7462	0.006181	1.7501	0.002366
9.5	0.8121	1.0	1.7525	0.059653	1.7914	0.020749	1.8048	0.007373	1.8091	0.003021
10.0	0.8732	1.0	1.8136	0.059690	1.8508	0.022448	1.8646	0.008628	1.8695	0.003768

Tabela 5.8: Coeficientes $[A, B]$ relativos às curvas padrão de ambientes com $\gamma = 5,0$ e desvanecimento lognormal σ .

σ	Célula Central		1º Anel		2º Anel		3º Anel		4º Anel	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0.0	0.2920	1.0	1.2455	0.046582	1.2912	0.000865	1.2919	0.000093	1.2920	0.000021
1.0	0.2710	1.0	1.2280	0.042958	1.2701	0.000913	1.2709	0.000098	1.2710	0.000022
1.5	0.2652	1.0	1.2234	0.041849	1.2643	0.000975	1.2651	0.000104	1.2652	0.000023
2.0	0.2624	1.0	1.2213	0.041155	1.2614	0.001070	1.2623	0.000115	1.2624	0.000025
2.5	0.2623	1.0	1.2215	0.040798	1.2611	0.001205	1.2621	0.000129	1.2622	0.000029
3.0	0.2650	1.0	1.2242	0.040790	1.2636	0.001395	1.2648	0.000149	1.2649	0.000033
3.5	0.2705	1.0	1.2294	0.041079	1.2688	0.001654	1.2703	0.000178	1.2704	0.000039
4.0	0.2791	1.0	1.2374	0.041657	1.2771	0.002009	1.2789	0.000217	1.2791	0.000048
4.5	0.2908	1.0	1.2484	0.042458	1.2884	0.002480	1.2906	0.000271	1.2908	0.000060
5.0	0.3059	1.0	1.2625	0.043446	1.3028	0.003091	1.3056	0.000349	1.3058	0.000077
5.5	0.3242	1.0	1.2797	0.044546	1.3204	0.003853	1.3238	0.000459	1.3241	0.000102
6.0	0.3460	1.0	1.3003	0.045708	1.3412	0.004777	1.3454	0.000616	1.3458	0.000138
6.5	0.3710	1.0	1.3241	0.046864	1.3652	0.005853	1.3702	0.000833	1.3708	0.000191
7.0	0.3995	1.0	1.3515	0.047970	1.3924	0.007073	1.3984	0.001129	1.3992	0.000270
7.5	0.4313	1.0	1.3823	0.048988	1.4228	0.008408	1.4297	0.001515	1.4309	0.000382
8.0	0.4664	1.0	1.4165	0.049889	1.4565	0.009839	1.4644	0.002001	1.4658	0.000540
8.5	0.5046	1.0	1.4539	0.050663	1.4933	0.011329	1.5020	0.002590	1.5038	0.000753
9.0	0.5458	1.0	1.4945	0.051297	1.5330	0.012855	1.5425	0.003281	1.5448	0.001030
9.5	0.5897	1.0	1.5379	0.051799	1.5753	0.014383	1.5856	0.004066	1.5883	0.001378
10.0	0.6357	1.0	1.5836	0.052165	1.6198	0.015895	1.6308	0.004934	1.6339	0.001800

Capítulo 6

Método Linear

Mencionamos na Seção 4.5 do Capítulo 4 que qualquer tipo de função que atendesse certos requisitos poderia ser utilizada para a criação de um novo método. Estes requisitos são :

- Um somatório destas funções deve descrever a distribuição de tráfego original.
- O processo de decomposição de tráfego deve ser simples.
- As funções devem ter integrais do tipo $\int_{A_j} \mathcal{F}dA$, fáceis de resolver.

Neste capítulo é proposto um novo tipo de função, denominada Platô Linear (\mathcal{PL}). Esta função atende os requisitos impostos e apresenta vantagens sobre a função platô (\mathcal{P}) pela maior simplicidade no desenvolvimento e aplicação de um algoritmo para o cálculo de F .

O método linear, que utiliza funções platô linear, foi desenvolvido seguindo o fluxograma da Figura 6.1 apresentando as seguintes etapas :

- Processo de Linearização de Tráfego (PLT)
- Processo Linear de Decomposição de Tráfego (PLDT)
- Processo Linear de Avaliação Parcial (PLAP)
- Processo Linear de Avaliação Final (PLAF)

Certamente existe muita semelhança com as etapas descritas no Capítulo 4. Os novos detalhes introduzidos neste novo método serão apresentados nas seções subseqüentes.

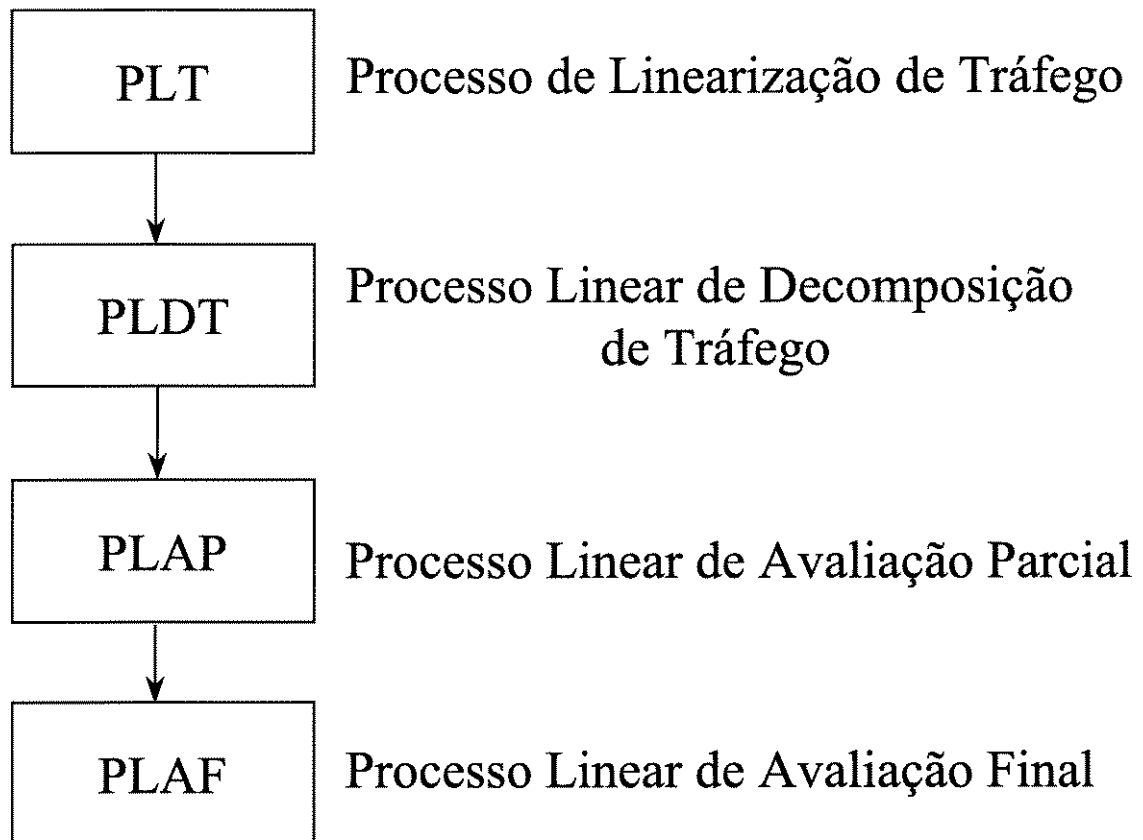


Figura 6.1: Fluxograma do método linear para o cálculo da eficiência de reuso de frequências do enlace reverso para ambientes com tráfego não uniforme.

6.1 Processo de Linearização de Tráfego (PLT)

Depois de definida qual é a célula alvo, o processo de linearização de tráfego concentra o tráfego das células de um mesmo anel. Todo o tráfego do anel deve ser acumulado dentro de uma única célula do próprio anel.

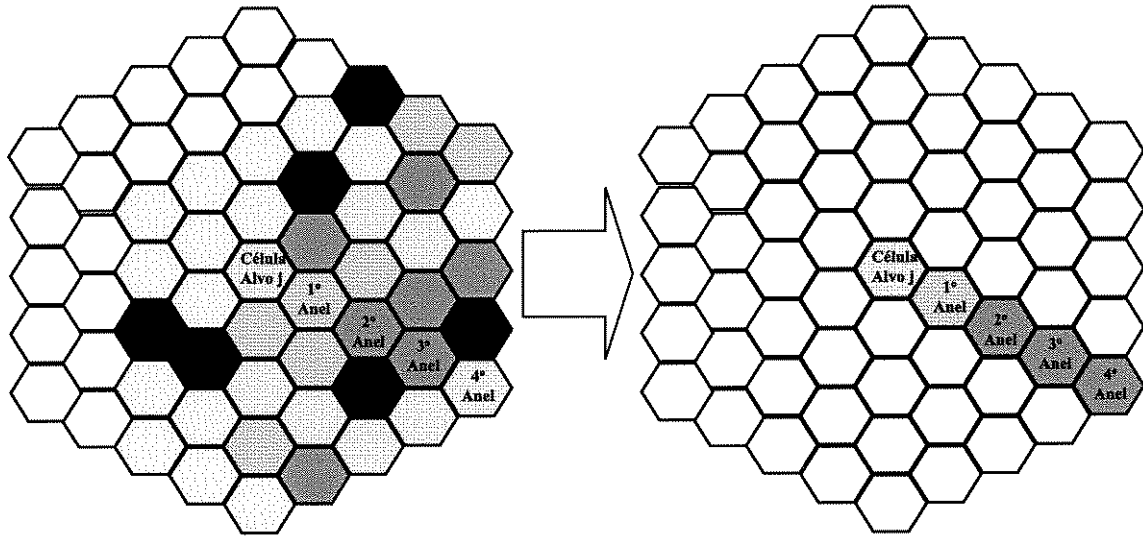


Figura 6.2: Processo de linearização de tráfego (PLT).

Após este processo, o tráfego do sistema estará acumulado em uma “linha” de células como mostrado na Figura 6.2.

6.2 Processo Linear de Decomposição de Tráfego (PLDT)

O processo linear de decomposição de tráfego consiste na decomposição da distribuição de tráfego original em um somatório de densidades de tráfego platô linear (\mathcal{PL}).

Considera-se que, em um sistema com L anéis, uma distribuição genérica de tráfego $\rho(x, y)$ pode ser escrita como

$$\rho(x, y) = \sum_{i=1}^L \rho_i \delta_i(x, y) , \quad (6.1)$$

onde ρ_i é a densidade de tráfego média no anel i e $\delta_i(x, y) = 1$ para $(x, y) \in A_i$ e $\delta_i(x, y) = 0$ nos outros casos.

Define-se $\rho_{min} = \min\{\rho_i\}$, $i = 1, 2, \dots, L$, e L_{min} como o número de anéis com $\rho_i = \rho_{min}$. Para cada anel i onde $\rho_i \neq \rho_{min}$ define-se ainda uma densidade de tráfego platô linear \mathcal{PL}_l (conseqüentemente, $1 \leq l \leq L - L_{min}$) de tal forma que

$$\mathcal{PL}_l = K_l p \delta_i(x, y) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^L p \delta_k(x, y) , \quad (6.2)$$

onde $K_l \geq 1$ (conseqüentemente $0 \leq 1/K_l \leq 1$) é dado por

$$K_l = 1 + \left(\frac{\rho_i}{\rho_{min}} - 1 \right) (L - L_{min}) , \quad (6.3)$$

e

$$p = \frac{\rho_{min}}{L - L_{min}} . \quad (6.4)$$

A distribuição de tráfego original linearizada pode ser decomposta em uma soma de distribuições platô linear, ou seja

$$\rho(x, y) = \sum_{l=1}^{L-L_{min}} \mathcal{PL}_l . \quad (6.5)$$

Através deste procedimento consegue-se, da mesma forma que no Capítulo 4, uma decomposição que não apresenta qualquer aproximação. A diferença para o PDT (Seção 4.3) é que o PLDT consegue representar a função original com um conjunto menor de funções. Isto implica em maior simplicidade na decomposição e nos procedimentos posteriores.

Apenas como ilustração, na Figura 6.3 temos a visualização das funções $\rho_i \delta_i(x, y)$ e \mathcal{PL}_l (platô linear).

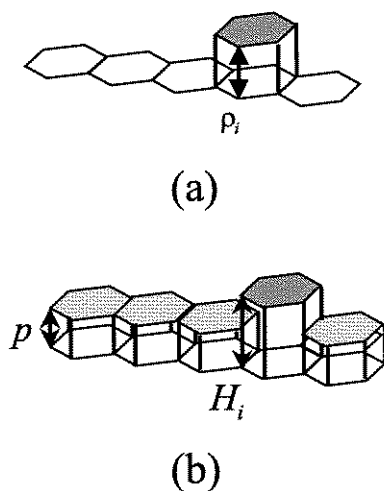


Figura 6.3: Funções do processo linear de decomposição de tráfego. (a) Função $\rho_i \delta_i(x, y)$. (b) Função Platô Linear - $K_l = H_i/p$.

6.3 Processo Linear de Avaliação Parcial (PLAP)

Dada uma distribuição platô linear no l -ésimo anel, a eficiência de reuso da célula alvo (célula central) pode ser estimada como

$$F_j = \begin{cases} \frac{K_l}{A + BK_l} & \mathcal{P}\mathcal{L}_l \text{ na célula } j \\ \frac{1}{A + BK_l} & \mathcal{P}\mathcal{L}_l \text{ no anel } l \neq 0 \end{cases}, \quad (6.6)$$

onde K_l foi definido na Equação 6.3, e os coeficientes A e B valem :

$$A = \begin{cases} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^L \frac{k_i}{k_j} & \mathcal{P}\mathcal{L}_l \text{ na célula } j \\ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq u}}^L \frac{k_i}{k_j} & \mathcal{P}\mathcal{L}_l \text{ no anel } l \neq 0 \end{cases}, \quad (6.7)$$

e

$$B = \begin{cases} 1 & \mathcal{P}\mathcal{L}_l \text{ na célula } j \\ \frac{k_u}{k_j} & \mathcal{P}\mathcal{L}_l \text{ no anel } l \neq 0 \end{cases}, \quad (6.8)$$

onde k_i é a interferência gerada pelo anel i sobre a célula j .

Os coeficientes A e B foram calculados e são apresentados nas Tabelas 6.1 até 6.7 para diversos ambientes de propagação com desvanecimento lognormal e diferentes anéis.

Dado K_l da l -ésima distribuição platô linear obtemos um $F_j^{(l)}$ (onde $1 \leq l \leq L - L_{min}$) pela Equação 6.6.

O conjunto de eficiências de reuso parciais $F_j^{(l)}$ será utilizado para calcular a eficiência de reuso total da célula j no processo linear de avaliação final da Seção 6.4.

6.4 Processo Linear de Avaliação Final (PLAF)

O processo linear de avaliação final calcula F_j a partir das eficiências de reuso parciais obtidas.

De forma análoga ao procedimento da Seção 4.5 (PAF), temos que

$$\frac{1}{F_j} = \frac{w_1}{F_j^{(1)}} + \frac{w_2}{F_j^{(2)}} + \dots + \frac{w_{L-L_{min}}}{F_j^{(L-L_{min})}}, \quad (6.9)$$

onde $F_j^{(l)}$ é a eficiência de reuso parcial relacionada à densidade de tráfego platô linear $\mathcal{P}\mathcal{L}_l$ definida como

$$F_j^{(l)} = \frac{k_j^{(l)}}{\sum_{i=1}^L k_i^{(l)}}, \quad (6.10)$$

e w_l são os pesos calculados da seguinte forma :

$$w_l = \frac{\sum_{v=1}^{L-L_{min}} \int_{A_j} \mathcal{P}\mathcal{L}_v dA_j}{\int_{A_j} \mathcal{P}\mathcal{L}_l dA_j}, \quad (6.11)$$

onde

$$\sum_{l=1}^{L-L_{min}} \frac{1}{w_l} = 1 . \quad (6.12)$$

Resolvendo a Equação 6.11 chega-se nas seguintes relações :

$$w_l = \begin{cases} \frac{\rho_{min}}{\rho_i} \left(\frac{1}{L-L_{min}} - 1 \right) + 1 & \text{se } i = j \\ \frac{\rho_{min}}{\rho_i(L-L_{min})} & \text{se } i \neq j \end{cases} . \quad (6.13)$$

6.5 Conclusões

Neste capítulo, apresentamos um método alternativo para o cálculo da eficiência de reuso de frequências do enlace reverso para perfis genéricos de tráfego. Com este novo método, obtivemos os mesmos resultados do método proposto no Capítulo 4 com a vantagem de um menor número de operações matemáticas. A proposta da função platô linear no lugar da platô permite que a distribuição original de tráfego seja representada por um número bem menor de funções. Por exemplo, no caso da Seção 4.6, foram necessárias 47 funções platô para representar a distribuição de tráfego original. Utilizando platô linear, apenas 4 funções foram suficientes. Com isso reduzimos o custo computacional com a aplicação do método linear.

Neste capítulo apresentamos ainda, os dados necessários para a aplicação do método linear no caso de ambientes com desvanecimento lognormal.

Tabela 6.1: Coeficientes $[A, B]$ para funções platô linear em ambientes com $\gamma = 2,0$ e desvanecimento lognormal σ .

σ	Célula Central		1º Anel		2º Anel		3º Anel		4º Anel	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0.0	0.2432	1.0	1.0723	0.170861	1.2003	0.042909	1.2243	0.018841	1.2326	0.010553
1.0	0.2402	1.0	1.0763	0.163959	1.1950	0.045253	1.2203	0.019870	1.2291	0.011129
1.5	0.2452	1.0	1.0815	0.163701	1.1968	0.048346	1.2239	0.021230	1.2333	0.011892
2.0	0.2539	1.0	1.0893	0.164595	1.2009	0.052943	1.2306	0.023295	1.2408	0.013048
2.5	0.2653	1.0	1.0999	0.165445	1.2064	0.058941	1.2391	0.026233	1.2506	0.014700
3.0	0.2782	1.0	1.1130	0.165220	1.2124	0.065821	1.2480	0.030202	1.2612	0.016995
3.5	0.2916	1.0	1.1280	0.163574	1.2188	0.072786	1.2564	0.035150	1.2715	0.020068
4.0	0.3044	1.0	1.1438	0.160572	1.2253	0.079134	1.2636	0.040758	1.2805	0.023933
4.5	0.3160	1.0	1.1594	0.156578	1.2315	0.084421	1.2694	0.046550	1.2875	0.028418
5.0	0.3257	1.0	1.1738	0.151891	1.2372	0.088487	1.2736	0.052092	1.2925	0.033227
5.5	0.3333	1.0	1.1865	0.146844	1.2420	0.091357	1.2762	0.057077	1.2953	0.038043
6.0	0.3387	1.0	1.1971	0.141610	1.2456	0.093157	1.2774	0.061340	1.2961	0.042610
6.5	0.3420	1.0	1.2056	0.136385	1.2480	0.094059	1.2772	0.064828	1.2953	0.046751
7.0	0.3434	1.0	1.2122	0.131232	1.2492	0.094226	1.2758	0.067563	1.2930	0.050369
7.5	0.3431	1.0	1.2169	0.126256	1.2493	0.093822	1.2735	0.069608	1.2897	0.053432
8.0	0.3414	1.0	1.2200	0.121459	1.2484	0.092969	1.2704	0.071044	1.2855	0.055948
8.5	0.3386	1.0	1.2217	0.116897	1.2468	0.091788	1.2666	0.071961	1.2806	0.057952
9.0	0.3348	1.0	1.2223	0.112546	1.2445	0.090358	1.2624	0.072439	1.2753	0.059493
9.5	0.3304	1.0	1.2219	0.108438	1.2416	0.088759	1.2578	0.072559	1.2698	0.060626
10.0	0.3254	1.0	1.2208	0.104539	1.2383	0.087037	1.2530	0.072382	1.2640	0.061404

Tabela 6.2: Coeficientes $[A, B]$ para funções platô linear em ambientes com $\gamma = 2, 5$ e desvanecimento lognormal σ .

σ	Célula Central		1º Anel		2º Anel		3º Anel		4º Anel	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0.0	0.1579	1.0	1.0323	0.125628	1.1367	0.021199	1.1504	0.007473	1.1543	0.003604
1.0	0.1538	1.0	1.0340	0.119772	1.1315	0.022361	1.1459	0.007883	1.1500	0.003802
1.5	0.1556	1.0	1.0364	0.119231	1.1317	0.023893	1.1472	0.008423	1.1515	0.004063
2.0	0.1599	1.0	1.0399	0.119968	1.1337	0.026206	1.1506	0.009242	1.1554	0.004458
2.5	0.1663	1.0	1.0449	0.121485	1.1369	0.029420	1.1559	0.010413	1.1613	0.005022
3.0	0.1745	1.0	1.0514	0.123149	1.1410	0.033533	1.1625	0.012040	1.1687	0.005811
3.5	0.1839	1.0	1.0595	0.124393	1.1455	0.038355	1.1696	0.014240	1.1770	0.006899
4.0	0.1939	1.0	1.0690	0.124884	1.1503	0.043551	1.1768	0.017071	1.1855	0.008380
4.5	0.2041	1.0	1.0795	0.124528	1.1553	0.048741	1.1836	0.020480	1.1937	0.010326
5.0	0.2141	1.0	1.0907	0.123393	1.1604	0.053607	1.1897	0.024305	1.2013	0.012746
5.5	0.2235	1.0	1.1018	0.121615	1.1655	0.057933	1.1951	0.028333	1.2079	0.015576
6.0	0.2320	1.0	1.1127	0.119348	1.1704	0.061609	1.1997	0.032350	1.2133	0.018694
6.5	0.2395	1.0	1.1227	0.116733	1.1749	0.064607	1.2033	0.036184	1.2175	0.021957
7.0	0.2458	1.0	1.1319	0.113889	1.1788	0.066951	1.2061	0.039715	1.2206	0.025228
7.5	0.2509	1.0	1.1400	0.110909	1.1822	0.068698	1.2080	0.042871	1.2225	0.028393
8.0	0.2548	1.0	1.1469	0.107866	1.1849	0.069918	1.2092	0.045619	1.2234	0.031367
8.5	0.2576	1.0	1.1527	0.104813	1.1869	0.070684	1.2096	0.047958	1.2235	0.034094
9.0	0.2593	1.0	1.1575	0.101790	1.1882	0.071067	1.2094	0.049904	1.2228	0.036545
9.5	0.2601	1.0	1.1613	0.098824	1.1890	0.071132	1.2087	0.051484	1.2214	0.038707
10.0	0.2602	1.0	1.1643	0.095935	1.1892	0.070935	1.2075	0.052732	1.2196	0.040583

Tabela 6.3: Coeficientes $[A, B]$ para funções platô linear em ambientes com $\gamma = 3,0$ e desvanecimento lognormal σ .

σ	Célula Central		1º Anel		2º Anel		3º Anel		4º Anel	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0.0	0.1116	1.0	1.0150	0.096563	1.1008	0.010737	1.1086	0.003020	1.1103	0.001252
1.0	0.1071	1.0	1.0158	0.091320	1.0958	0.011324	1.1040	0.003185	1.1058	0.001320
1.5	0.1074	1.0	1.0169	0.090482	1.0953	0.012098	1.1040	0.003403	1.1060	0.001410
2.0	0.1092	1.0	1.0186	0.090690	1.0960	0.013275	1.1055	0.003734	1.1077	0.001548
2.5	0.1126	1.0	1.0209	0.091738	1.0977	0.014938	1.1084	0.004207	1.1109	0.001743
3.0	0.1174	1.0	1.0241	0.093338	1.1002	0.017180	1.1125	0.004867	1.1154	0.002017
3.5	0.1233	1.0	1.0282	0.095128	1.1033	0.020012	1.1175	0.005778	1.1209	0.002396
4.0	0.1301	1.0	1.0333	0.096767	1.1067	0.023377	1.1231	0.007015	1.1272	0.002922
4.5	0.1374	1.0	1.0394	0.098025	1.1103	0.027115	1.1288	0.008639	1.1338	0.003647
5.0	0.1451	1.0	1.0463	0.098763	1.1141	0.031042	1.1344	0.010671	1.1405	0.004627
5.5	0.1529	1.0	1.0539	0.098976	1.1179	0.034953	1.1398	0.013068	1.1470	0.005900
6.0	0.1606	1.0	1.0619	0.098678	1.1219	0.038691	1.1448	0.015751	1.1531	0.007477
6.5	0.1680	1.0	1.0701	0.097960	1.1259	0.042130	1.1494	0.018604	1.1587	0.009329
7.0	0.1750	1.0	1.0781	0.096876	1.1298	0.045204	1.1535	0.021520	1.1636	0.011404
7.5	0.1814	1.0	1.0859	0.095524	1.1335	0.047875	1.1570	0.024395	1.1678	0.013631
8.0	0.1872	1.0	1.0932	0.093947	1.1370	0.050141	1.1600	0.027153	1.1712	0.015938
8.5	0.1922	1.0	1.1000	0.092229	1.1402	0.052017	1.1625	0.029734	1.1740	0.018255
9.0	0.1966	1.0	1.1062	0.090392	1.1430	0.053528	1.1644	0.032104	1.1760	0.020526
9.5	0.2002	1.0	1.1117	0.088501	1.1454	0.054711	1.1659	0.034240	1.1775	0.022705
10.0	0.2031	1.0	1.1165	0.086560	1.1475	0.055597	1.1669	0.036138	1.1783	0.024760

Tabela 6.4: Coeficientes $[A, B]$ para funções platô linear em ambientes com $\gamma = 3, 5$ e desvanecimento lognormal σ .

σ	Célula Central		1º Anel		2º Anel		3º Anel		4º Anel	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0.0	0.0843	1.0	1.0072	0.077029	1.0787	0.005556	1.0830	0.001239	1.0838	0.000440
1.0	0.0800	1.0	1.0076	0.072332	1.0741	0.005860	1.0787	0.001307	1.0795	0.000465
1.5	0.0795	1.0	1.0082	0.071325	1.0732	0.006262	1.0781	0.001397	1.0790	0.000496
2.0	0.0801	1.0	1.0089	0.071112	1.0732	0.006870	1.0785	0.001532	1.0795	0.000545
2.5	0.0817	1.0	1.0101	0.071616	1.0740	0.007739	1.0800	0.001727	1.0811	0.000614
3.0	0.0843	1.0	1.0116	0.072704	1.0754	0.008931	1.0823	0.001997	1.0836	0.000710
3.5	0.0879	1.0	1.0137	0.074191	1.0774	0.010506	1.0855	0.002373	1.0871	0.000843
4.0	0.0923	1.0	1.0164	0.075862	1.0798	0.012489	1.0894	0.002892	1.0912	0.001029
4.5	0.0973	1.0	1.0197	0.077507	1.0824	0.014858	1.0937	0.003602	1.0960	0.001288
5.0	0.1027	1.0	1.0237	0.078958	1.0852	0.017546	1.0982	0.004551	1.1011	0.001651
5.5	0.1085	1.0	1.0284	0.080107	1.0880	0.020453	1.1027	0.005769	1.1063	0.002153
6.0	0.1145	1.0	1.0335	0.080904	1.0910	0.023464	1.1072	0.007260	1.1116	0.002827
6.5	0.1205	1.0	1.0392	0.081341	1.0940	0.026469	1.1115	0.008998	1.1168	0.003696
7.0	0.1265	1.0	1.0451	0.081440	1.0971	0.029375	1.1156	0.010936	1.1218	0.004768
7.5	0.1324	1.0	1.0512	0.081235	1.1003	0.032111	1.1194	0.013013	1.1264	0.006030
8.0	0.1380	1.0	1.0573	0.080770	1.1034	0.034628	1.1229	0.015166	1.1306	0.007458
8.5	0.1433	1.0	1.0632	0.080087	1.1064	0.036900	1.1260	0.017334	1.1343	0.009015
9.0	0.1483	1.0	1.0690	0.079228	1.1094	0.038912	1.1288	0.019466	1.1376	0.010661
9.5	0.1528	1.0	1.0745	0.078227	1.1121	0.040667	1.1313	0.021522	1.1404	0.012357
10.0	0.1568	1.0	1.0797	0.077117	1.1147	0.042172	1.1334	0.023470	1.1428	0.014064

Tabela 6.5: Coeficientes $[A, B]$ para funções platô linear em ambientes com $\gamma = 4,0$ e desvanecimento lognormal σ .

σ	Célula Central		1º Anel		2º Anel		3º Anel		4º Anel	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0.0	0.0671	1.0	1.0036	0.063537	1.0642	0.002936	1.0666	0.000516	1.0670	0.000157
1.0	0.0630	1.0	1.0038	0.059231	1.0599	0.003096	1.0625	0.000544	1.0629	0.000165
1.5	0.0622	1.0	1.0041	0.058132	1.0589	0.003307	1.0616	0.000581	1.0620	0.000177
2.0	0.0621	1.0	1.0045	0.057664	1.0585	0.003630	1.0615	0.000638	1.0619	0.000194
2.5	0.0628	1.0	1.0050	0.057747	1.0587	0.004088	1.0621	0.000719	1.0626	0.000219
3.0	0.0642	1.0	1.0058	0.058352	1.0594	0.004727	1.0633	0.000832	1.0639	0.000253
3.5	0.0662	1.0	1.0069	0.059364	1.0607	0.005587	1.0653	0.000988	1.0659	0.000300
4.0	0.0690	1.0	1.0083	0.060683	1.0623	0.006715	1.0678	0.001205	1.0686	0.000367
4.5	0.0723	1.0	1.0101	0.062160	1.0641	0.008126	1.0707	0.001507	1.0718	0.000459
5.0	0.0760	1.0	1.0123	0.063668	1.0662	0.009826	1.0741	0.001925	1.0754	0.000590
5.5	0.0801	1.0	1.0150	0.065085	1.0684	0.011775	1.0776	0.002492	1.0794	0.000776
6.0	0.0845	1.0	1.0182	0.066327	1.0706	0.013930	1.0813	0.003235	1.0835	0.001039
6.5	0.0891	1.0	1.0218	0.067345	1.0729	0.016216	1.0850	0.004169	1.0877	0.001402
7.0	0.0939	1.0	1.0258	0.068109	1.0753	0.018573	1.0886	0.005294	1.0920	0.001886
7.5	0.0986	1.0	1.0300	0.068627	1.0777	0.020926	1.0921	0.006592	1.0961	0.002504
8.0	0.1034	1.0	1.0345	0.068898	1.0802	0.023225	1.0954	0.008036	1.1002	0.003262
8.5	0.1081	1.0	1.0392	0.068957	1.0827	0.025420	1.0985	0.009589	1.1040	0.004156
9.0	0.1127	1.0	1.0439	0.068814	1.0852	0.027482	1.1015	0.011215	1.1075	0.005172
9.5	0.1171	1.0	1.0486	0.068511	1.0877	0.029386	1.1042	0.012873	1.1108	0.006292
10.0	0.1212	1.0	1.0531	0.068056	1.0901	0.031122	1.1067	0.014534	1.1137	0.007493

Tabela 6.6: Coeficientes $[A, B]$ para funções platô linear em ambientes com $\gamma = 4, 5$ e desvanecimento lognormal σ .

σ	Célula Central		1º Anel		2º Anel		3º Anel		4º Anel	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0.0	0.0556	1.0	1.0019	0.053766	1.0540	0.001579	1.0554	0.000217	1.0556	0.000056
1.0	0.0518	1.0	1.0020	0.049855	1.0501	0.001666	1.0516	0.000229	1.0517	0.000060
1.5	0.0508	1.0	1.0021	0.048744	1.0491	0.001780	1.0506	0.000245	1.0508	0.000064
2.0	0.0504	1.0	1.0023	0.048118	1.0485	0.001953	1.0501	0.000269	1.0503	0.000070
2.5	0.0505	1.0	1.0026	0.047937	1.0483	0.002200	1.0502	0.000303	1.0504	0.000079
3.0	0.0512	1.0	1.0030	0.048171	1.0486	0.002545	1.0508	0.000351	1.0511	0.000091
3.5	0.0523	1.0	1.0035	0.048776	1.0493	0.003016	1.0519	0.000416	1.0522	0.000108
4.0	0.0540	1.0	1.0043	0.049690	1.0503	0.003648	1.0535	0.000508	1.0538	0.000132
4.5	0.0561	1.0	1.0053	0.050832	1.0516	0.004468	1.0555	0.000636	1.0559	0.000165
5.0	0.0586	1.0	1.0065	0.052115	1.0531	0.005497	1.0578	0.000816	1.0584	0.000213
5.5	0.0615	1.0	1.0081	0.053447	1.0548	0.006736	1.0605	0.001069	1.0613	0.000281
6.0	0.0647	1.0	1.0100	0.054746	1.0565	0.008173	1.0633	0.001416	1.0643	0.000379
6.5	0.0681	1.0	1.0122	0.055948	1.0583	0.009782	1.0663	0.001879	1.0676	0.000520
7.0	0.0717	1.0	1.0147	0.057006	1.0602	0.011525	1.0693	0.002473	1.0710	0.000720
7.5	0.0755	1.0	1.0176	0.057894	1.0621	0.013357	1.0722	0.003207	1.0745	0.000993
8.0	0.0793	1.0	1.0207	0.058599	1.0640	0.015235	1.0752	0.004078	1.0779	0.001353
8.5	0.0831	1.0	1.0240	0.059122	1.0660	0.017116	1.0780	0.005075	1.0813	0.001810
9.0	0.0870	1.0	1.0275	0.059469	1.0680	0.018964	1.0808	0.006181	1.0846	0.002366
9.5	0.0908	1.0	1.0311	0.059653	1.0700	0.020749	1.0834	0.007373	1.0878	0.003021
10.0	0.0945	1.0	1.0348	0.059690	1.0721	0.022448	1.0859	0.008628	1.0908	0.003768

Tabela 6.7: Coeficientes $[A, B]$ para funções platô linear em ambientes com $\gamma = 5,0$ e desvanecimento lognormal σ .

σ	Célula Central		1º Anel		2º Anel		3º Anel		4º Anel	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0.0	0.0476	1.0	1.0010	0.046582	1.0467	0.000865	1.0475	0.000093	1.0475	0.000021
1.0	0.0440	1.0	1.0010	0.042958	1.0431	0.000913	1.0439	0.000098	1.0440	0.000022
1.5	0.0430	1.0	1.0011	0.041849	1.0420	0.000975	1.0428	0.000104	1.0429	0.000023
2.0	0.0424	1.0	1.0012	0.041155	1.0413	0.001070	1.0422	0.000115	1.0423	0.000025
2.5	0.0422	1.0	1.0014	0.040798	1.0410	0.001205	1.0420	0.000129	1.0421	0.000029
3.0	0.0424	1.0	1.0016	0.040790	1.0410	0.001395	1.0422	0.000149	1.0423	0.000033
3.5	0.0430	1.0	1.0019	0.041079	1.0413	0.001654	1.0428	0.000178	1.0429	0.000039
4.0	0.0439	1.0	1.0023	0.041657	1.0419	0.002009	1.0437	0.000217	1.0439	0.000048
4.5	0.0453	1.0	1.0028	0.042458	1.0428	0.002480	1.0450	0.000271	1.0452	0.000060
5.0	0.0470	1.0	1.0035	0.043446	1.0439	0.003091	1.0466	0.000349	1.0469	0.000077
5.5	0.0490	1.0	1.0044	0.044546	1.0451	0.003853	1.0485	0.000459	1.0489	0.000102
6.0	0.0512	1.0	1.0055	0.045708	1.0465	0.004777	1.0506	0.000616	1.0511	0.000138
6.5	0.0537	1.0	1.0069	0.046864	1.0479	0.005853	1.0529	0.000833	1.0535	0.000191
7.0	0.0564	1.0	1.0085	0.047970	1.0494	0.007073	1.0553	0.001129	1.0562	0.000270
7.5	0.0593	1.0	1.0103	0.048988	1.0509	0.008408	1.0578	0.001515	1.0589	0.000382
8.0	0.0623	1.0	1.0124	0.049889	1.0524	0.009839	1.0603	0.002001	1.0617	0.000540
8.5	0.0653	1.0	1.0147	0.050663	1.0540	0.011329	1.0627	0.002590	1.0646	0.000753
9.0	0.0685	1.0	1.0172	0.051297	1.0556	0.012855	1.0652	0.003281	1.0674	0.001030
9.5	0.0716	1.0	1.0198	0.051799	1.0572	0.014383	1.0676	0.004066	1.0702	0.001378
10.0	0.0748	1.0	1.0226	0.052165	1.0589	0.015895	1.0699	0.004934	1.0730	0.001800

Capítulo 7

Considerações Finais

Nesta tese foram apresentados dois novos métodos para a determinação da eficiência de reuso de frequências (F) no enlace reverso para perfis genéricos de tráfego. O primeiro método, descrito no Capítulo 4, apresenta uma solução eficiente para o problema resultando na publicação de um artigo internacional [28]. O segundo método, descrito no Capítulo 6, constitui uma otimização do primeiro. Através de um processo de linearização de tráfego, propusemos o método linear que é computacionalmente mais rápido e mais simples na sua aplicação que o primeiro.

Ambos os métodos propostos nesta tese são precisos e extremamente rápidos quando comparados aos tradicionais modelos de simulação ou integração numérica. O impacto prático desta maior velocidade fica claro quando calculamos a eficiência de reuso de várias células como o caso do exemplo da Seção 4.6.

As contribuições desta tese resultam em significativo avanço na melhoria da qualidade do projeto de sistemas celulares CDMA na medida em que o parâmetro de eficiência de reuso é considerado crítico na etapa de planejamento.

Vários dados foram levantados para ambientes com desvanecimento lognormal (Capítulos 5 e 6), fazendo com que os métodos propostos tenham ampla faixa de aplicação atendendo a diversas situações de propagação.

Certamente, este trabalho não resolve todos os problemas relacionados ao cálculo de F , mas abre caminho para trabalhos futuros, cujas propostas são apresentadas a seguir :

- Estender o método para ser aplicado ao enlace direto CDMA.

-
- Estender a metodologia para o caso de células com tamanhos diferentes em um mesmo sistema.
 - Estender o método para o caso de células em um mesmo anel com distâncias diferentes da célula alvo.
 - Integrar os métodos propostos com uma plataforma de predição de cobertura.

Apêndice A

Eficiência de Reuso para Ambientes com Desvanecimento Lognormal

A interferência média gerada por uma “outra célula” em um sistema celular pode ser definida como [16]

$$E[I/S] \leq \alpha \int_{A_i} \left(\frac{r_s}{r_a}\right)^\gamma \underbrace{E[10^{x/10} \mathcal{O}(\chi, r_a/r_s)]}_{f\left(\frac{r_s}{r_a}\right)} \rho(x, y) dA, \quad (\text{A.1})$$

onde χ é uma variável aleatória lognormal que descreve o desvanecimento do ambiente de propagação do sinal, e a função $\mathcal{O}(\cdot)$ é definida como

$$\mathcal{O}(\chi, r_a/r_s) = \begin{cases} 1 & \text{se } \chi \leq 10\gamma \log\left(\frac{r_a}{r_s}\right) \\ 0 & \text{outro caso} \end{cases}. \quad (\text{A.2})$$

A esperança $f(r_s/r_a)$ pode ser desenvolvida como

$$\begin{aligned} f\left(\frac{r_s}{r_a}\right) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-x^2/4\sigma^2}}{\sqrt{4\pi\sigma^2}} 10^{x/10} \mathcal{O}(x, r_a/r_s) dx \\ &= \int_{-\infty}^{10\gamma \log\left(\frac{r_a}{r_s}\right)} \frac{e^{-x^2/4\sigma^2}}{\sqrt{4\pi\sigma^2}} 10^{x/10} dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{10\gamma \log\left(\frac{r_a}{r_s}\right) e^{-x^2/4\sigma^2}}{\sqrt{4\pi\sigma^2}} e^{x \ln 10/10} dx \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{10\gamma \log\left(\frac{r_a}{r_s}\right) \exp\left[-\frac{x^2}{4\sigma^2} + \frac{x \ln 10}{10}\right]}{\sqrt{4\pi\sigma^2}} dx \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{10\gamma \log\left(\frac{r_a}{r_s}\right) \exp\left[-\frac{x^2}{4\sigma^2} + \frac{x \ln 10}{10} + \left(\frac{\sigma \ln 10}{10}\right)^2 - \left(\frac{\sigma \ln 10}{10}\right)^2\right]}{\sqrt{4\pi\sigma^2}} dx \\
&= e^{\left(\frac{\sigma \ln 10}{10}\right)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{10\gamma \log\left(\frac{r_a}{r_s}\right) \exp\left[-\frac{x^2}{4\sigma^2} + \frac{x \ln 10}{10} - \left(\frac{\sigma \ln 10}{10}\right)^2\right]}{\sqrt{4\pi\sigma^2}} dx \\
&= e^{\left(\frac{\sigma \ln 10}{10}\right)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{10\gamma \log\left(\frac{r_a}{r_s}\right) \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sqrt{2\sigma^2}} + \frac{\sqrt{2\sigma^2} \ln 10}{10}\right)^2\right]}{\sqrt{4\pi\sigma^2}} dx \\
&= e^{\left(\frac{\sigma \ln 10}{10}\right)^2} \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_Y^{\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy \right\}, \tag{A.3}
\end{aligned}$$

onde

$$y = \frac{x}{\sqrt{2\sigma^2}} - \frac{\sqrt{2\sigma^2} \ln 10}{10}, \tag{A.4}$$

e

$$Y = \frac{10\gamma \log(r_a/r_s)}{\sqrt{2\sigma^2}} - \frac{\sqrt{2\sigma^2} \ln 10}{10}. \tag{A.5}$$

A Equação A.3 pode ainda ser representada em termos da função $Q(\cdot)$, ou seja

$$f\left(\frac{r_m}{r_0}\right) = e^{\left(\frac{\sigma \ln 10}{10}\right)^2} \{1 - Q(Y)\}, \tag{A.6}$$

onde a função $Q(\cdot)$ é definida como [21]

$$Q(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \tag{A.7}$$

Desta forma, temos que F_j , para ambientes com desvanecimento lognormal, é dado por

$$F_j = \frac{\int_{A_j} \rho(x, y) dA}{\sum_{i=1}^M \int_{A_i} \left(\frac{r_s}{r_a}\right)^\gamma \exp\left[\left(\frac{\sigma \ln 10}{10}\right)^2\right] \left\{1 - Q\left[\frac{10\gamma \log\left(\frac{r_a}{r_s}\right)}{\sqrt{2\sigma^2}} - \sqrt{2\sigma^2} \frac{\ln 10}{10}\right]\right\} \rho(x, y) dA} \quad (\text{A.8})$$

□

Apêndice B

Plataforma de Simulação

O objetivo do desenvolvimento desta plataforma de simulação foi para confirmar os resultados obtidos através dos métodos descritos nos Capítulos 4 e 6. De fato, esta confirmação também foi feita através da integração numérica da Equação 2.35.

B.1 Introdução

Esta plataforma foi desenvolvida com uma estrutura orientada a objetos para facilitar a reutilização do código gerado. Procurou-se criar uma série de bibliotecas na linguagem C++ que implementam novos tipos e executam a interface com rotinas de difícil manipulação. Desta forma, eleva-se o nível de programação para formas mais amigáveis.

De uma forma geral, foram criadas várias classes que podem ser classificadas em dois tipos :

a) Classes Funcionais - são classes que implementam funcionalidades básicas imprescindíveis para desenvolvimentos mais complexos.

b) Classes Celular - são classes que implementam funcionalidades relacionadas aos sistemas de telefonia celular.

Nas seções subseqüentes vamos descrever cada uma destas classes.

Tabela B.1: *Classes funcionais utilizadas na implementação da plataforma de simulação.*

Classe	Biblioteca
<i>DoubleLinkedList</i>	Datastr.h
<i>Fifo</i>	Datastr.h
<i>Filo</i>	Datastr.h
<i>LinkedList</i>	Datastr.h
<i>KFunction</i>	Function.h
<i>InformationPack</i>	InfoPack.h
<i>MapManager</i>	Map.h
<i>Map</i>	Map.h
<i>Matrix</i>	Matrix.h
<i>Timer</i>	Timer.h
<i>Vector</i>	Vector.h

B.2 Classes Funcionais

Para facilitar a programação é sempre interessante criar uma série de classes funcionais. Para esta plataforma foram implementadas as classes funcionais da Tabela B.1.

Uma breve descrição de cada uma das classes é a seguinte :

- *DoubleLinkedList* - Lista duplamente ligada.
- *Fifo* - Fila do tipo primeiro que entra é o primeiro que sai.
- *Filo* - Fila do tipo primeiro que entra é o último que sai.
- *LinkedList* - Lista ligada.
- *KFunction* - Manipulação de funções algébricas para facilitar a sua passagem como um parâmetro de chamada de funções de outras classes.
- *InformationPack* - Manipulação de pacotes de dados gerais para facilitar a sua passagem como um parâmetro de chamada de funções de outras classes.
- *MapManager* - Gerenciamento de mapas.
- *Map* - Classe básica de um mapa qualquer.

Tabela B.2: *Classes celular utilizadas na implementação da plataforma de simulação.*

Classe	Biblioteca
<i>CallController</i>	Callctrl.h
<i>BaseStation</i>	Bs.h
<i>BSset</i>	Bs.h
<i>Environment</i>	Environment.h
<i>BestServercMap</i>	Map.h
<i>CellularMapManager</i>	Map.h
<i>MorfoMap</i>	Map.h
<i>TopoMap</i>	Map.h
<i>TrafficMap</i>	Map.h
<i>PredictionMethod</i>	Method.h
<i>PredictionModel</i>	Model.h
<i>DiffractionModel</i>	Model.h
<i>PropagationModel</i>	Model.h
<i>ReflectionModel</i>	Model.h
<i>MorfoType</i>	Morfo.h
<i>Subscriber</i>	Subscriber.h

- *Matrix* - Matriz e operações com matriz.
- *Timer* - Gera e controla uma base de tempo para um processo.
- *Vector* - Vetor e operações com vetor.

B.3 Classes Celular

Este conjunto de classes utiliza as classes básicas e bibliotecas padrão da linguagem C++ para criar objetos que representam elementos e procedimentos de um sistema de telefonia celular. A Tabela B.2 mostra a lista de classes implementadas.

Uma breve descrição de cada uma das classes é a seguinte :

- *CallController* - Executa o controle da chamada dos usuários de um sistema, gerenciando os dados dos assinantes.
- *BaseStation* - Estação rádio-base.

- *BSset* - Conjunto de estações rádio-base.
- *Environment* - Ambiente celular.
- *BestServercMap* - Mapa de melhor estação rádio-base servidora.
- *CellularMapManager* - Gerenciador de mapas.
- *MorfoMap* - Mapa de morfologia.
- *TopoMap* - Mapa de topografia.
- *TrafficMap* - Mapa de tráfego.
- *PredictionMethod* - Método de predição de cobertura.
- *PredictionModel* - Modelo de predição de cobertura.
- *DiffractionModel* - Modelo de difração para o cálculo de cobertura.
- *PropagationModel* - Modelo de propagação para o cálculo de cobertura.
- *ReflectionModel* - Modelo de reflexão para o cálculo de cobertura.
- *MorfoType* - Tipos de morfologia.
- *Subscriber* - Assinante celular.

B.4 Plataforma de Simulação para o Cálculo da Eficiência de Reuso de Freqüências

Utilizando as classes funcionais e classes celular, a implementação da plataforma para o cálculo da eficiência de reuso de freqüências é feita de forma relativamente simples.

Basta criar um ambiente celular utilizando a classe *Environment* da seguinte forma :

```
Environment cellenv("5tier.map");
```

O arquivo *5tier.map* deve conter a apropriada configuração dos parâmetros de *cellenv*. Desta forma, cria-se um procedimento para calcular a eficiência de reuso para a célula central de um sistema da seguinte forma :

```
double F = 0, last = 0;
do {
  cellenv.Iter();
  double Ioc = cellenv.OtherCellInterference(CELL0);
  double Ioc = cellenv.OtherCellInterference(CELL0);
  double Imc = cellenv.SameCellInterference(CELL0);
  last = F;
  F += Imc / (Ioc + Imc);
  Erro = last/(cellenv.Niter() - 1) - F/cellenv.Niter();
}while(Erro ≤ PRECISAO);
F = F/cellenv.Niter();
```

Com os resultados desta rotina de cálculo, confirma-se os resultados obtidos com os métodos dos Capítulos 4 e 6.

As bibliotecas de classes desenvolvidas permitem ainda ampliar a funcionalidade da plataforma para executar outros cálculos tais como : predição de cobertura, cálculo de interferência, etc. Esta flexibilidade é decorrente da estrutura orientada a objetos imposta no desenvolvimento.

Referências Bibliográficas

- [1] Theodore S. Rappaport. *Wireless Communications*. Prentice Hall PTR, 1996.
- [2] Antônio M. Ferrari. *Telecomunicações Evolução e Revolução*. Érica, 1998.
- [3] Donald C. Cox. Personal Communications - A Viewpoint. *IEEE Commun. Magazine*, pages 8–20, November 1990.
- [4] Ramjee Prasad. *CDMA for Wireless Personal Communications*. Artech House Publishers, 1996.
- [5] Qualcomm Inc. *The CDMA Network Engineering Handbook - Volume 1*. Qualcomm, 1993.
- [6] Michel D. Yacoub. *Foundations of Mobile Radio Engineering*. CRC Press, 1993.
- [7] Jerry D. Gibson. *The Mobile Communications Handbook*. CRC Press, 1998.
- [8] William C. Y. Lee. *Mobile Communications Engineering*. McGraw Hill, 1982.
- [9] John D. Parsons. *The Mobile Radio Propagation Channel*. Pentech Press, 1992.
- [10] Clint Smith e Curt Gervellis. *Cellular System Design and Optimization*. McGraw-Hill, 1996.
- [11] C. K. d'Ávila and M. D. Yacoub. Predição de Cobertura Celular com Métodos Empíricos e Estatísticos Combinados. *TELEMO'96 - Curitiba (BR)*, Set 1996.

- [12] A. A. Faria; C. K. d'Ávila and M. D. Yacoub. Predição de Cobertura em Ambientes Indoor Utilizando Ray-Tracing Força Bruta Modificado. *TELEMO'96 - Curitiba (BR)*, Set 1996.
- [13] César K. d'Ávila. *Uma Plataforma Flexível de Predição de Cobertura Celular com Métodos Empíricos e Estatísticos Combinados - Dissertação de Mestrado*. Universidade Estadual de Campinas, 1995.
- [14] C. K. d'Ávila and M. D. Yacoub. Plataforma Flexível de Predição de Cobertura Celular. *II Encontro Nacional de Software para Microondas e Optoeletrônica (SBMO) - Campinas (BR)*, Dez 1995.
- [15] D. Kwon; E. Shin; J. Kim and I. Jeong. Effects of Path Loss and Cell Loading on Frequency Reuse Efficiency and Soft Handoff in CDMA System. *IEICE Transactions on Fundamentals*, E79-A:790–795, Jun 1996.
- [16] K. S. Gilhousen; I. M. Jacobs; R. Padovani; A. J. Viterbi; L. A. Weaver Jr. and C. E. Wheatley III. On the Capacity of a Cellular CDMA System. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 40(2), May 1991.
- [17] C. de Almeida and R. P. F. Hoefel. On the Interference of Cellular CDMA Systems. *International Telecommunications Symposium (ITS'98) - São Paulo - Brazil*, pages 166–171, Ago 1998.
- [18] Kyoung Kim. CDMA Cellular Engineering Issues. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 42(3), Aug 1993.
- [19] Michel G. Jansen and Ramjee Prasad. Capacity Throughput, and Delay Analysis of a Cellular DS-CDMA System With Imperfect Power Control and Imperfect Sectorization. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 41(2), Apr 1993.
- [20] Man Y. Rhee. *CDMA Cellular Mobile Communications Network Security*. Prentice Hall, 1998.
- [21] Peyton Z. Peebles Jr. *Probability, Random Variables, and Random Signal Principles*. McGraw Hill, 1993.
- [22] W. H. Press; B. P. Flannery; S. A. Teukolsky and W. T. Vetterling. *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press, 1990.

- [23] EIA/TIA. *IS-95 - Mobile Station-Base Station Compatibility Standard for Dual-Mode Wideband Spread Spectrum Cellular System*. 1993.
- [24] C. K. d'Ávila and M. D. Yacoub. Frequency Reuse Efficiency in CDMA Systems : From an Uniform to a Bell-Shaped Traffic Distribution. *International Telecommunications Symposium (ITS'98) - São Paulo (Brazil)*, pages 161–165, Aug 1998.
- [25] Samuel C. Yang. *CDMA RF System Engineering*. Artech House Publisers, 1998.
- [26] M. Hata. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 29(3):317–325, September 1980.
- [27] G. L. Siqueira; E. A. Vásquez; R. A. Gomes; C. B. Sampaio; D. A. Borgui. Medidas de Cobertura de Sistemas Móveis Celulares em Áreas Urbanas : Comparação com Modelos de Predição. *TELEMO'96 - Curitiba (BR)*, Set 1996.
- [28] C. K. d'Ávila and M. D. Yacoub. Reuse Efficiency for Non-Uniform Traffic Distributions in CDMA Systems. *Electronics Letters*, 34(13), Jun 1998.
- [29] Y. Okumura; E. Ohmori; T. Kawano and K. Fukuda. Field Strenght and Its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service. *Review of the Electrical Communication Laboratories*, 16(9-10):825–873, September-October 1968.
- [30] J. D. Parsons and M. F. Ibrahim. Signal Strenght Prediction in Built-Up Areas. Part 2 : Signal Variability. *IEE Proceedings - F*, 130(5):385–391, August 1983.
- [31] M. J. Marsan; G. C. Hess; S. S. Gilbert. Shadowing Variability in an Urban Land Mobile Environment at 900 MHz. *Electronics Letters*, 26(10):646–648, April 1990.
- [32] Douglas O. Reudink. Comparison of Radio Transmission at X-Band Frequencies in Suburban and Urban Areas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 20(1):470–473, July 1972.