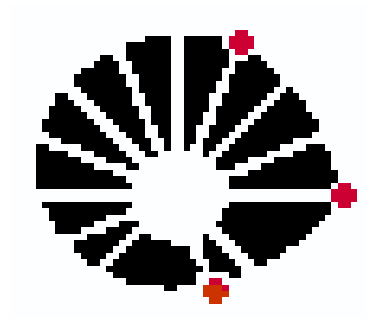


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE COMUNICAÇÕES - DECOM



ANÁLISE DA CAPACIDADE DE SISTEMAS CDMA EM AMBIENTES FECHADOS

TESE DE MESTRADO

Por

MÁRCIO RICARDO VIEIRA

CELSO DE ALMEIDA - ORIENTADOR

TESE SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA
UNICAMP COMO PARTE DOS REQUISITOS EXIGIDOS PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Roger Pierre Fabris Hoefel - Universidade de Santa Cruz do Sul

Prof. Dr. Renato Baldini Filho - FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Jaime Portugheis - FEEC/UNICAMP

Campinas, Abril de 2001.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

V673a Vieira, Márcio Ricardo
Análise da capacidade de sistemas CDMA em
ambientes fechados / Márcio Ricardo Vieira. –
Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientador: Celso de Almeida
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e
Computação.

1.Estações móveis de rádio. 2.Rádio - Interferência.
3. Sistemas de comunicação móvel. 4. Telefonia celular.
I. Almeida, Celso de. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação. III. Título.

Resumo

Neste trabalho é analisada a capacidade, para o enlace reverso de sistemas CDMA em ambientes fechados. Primeiramente, para representar este sistema, utilizou-se um modelo bidimensional baseado em um arranjo de células quadradas com controle de potência realizado por uma dentre as E ERBs (Estação Rádio-Base) mais próximas. Equações foram propostas para a obtenção dos valores analíticos da média e do desvio padrão das interferências interna e externa desse sistema. Posteriormente foi feita uma comparação entre esses valores analíticos e os valores obtidos empiricamente através de simulação do tipo Monte Carlo para verificar a validade destas equações. O mesmo estudo foi feito utilizando-se um modelo tridimensional com três andares baseado no mesmo arranjo de células quadradas, mas com controle de potência realizado pela ERB mais próxima e pela ERB mais forte (a ERB com melhor relação sinal-interferência). Quando nós utilizamos o controle de potência realizado pela ERB mais forte, nós tivemos que utilizar uma aproximação baseada nos valores obtidos empiricamente para a obtenção das equações. Foram considerados os efeitos de parâmetros como: monitoração da atividade de voz, sombreamento log-normal, atenuação de parede, atenuação de piso e perda de percurso. A probabilidade da perda de desempenho também foi obtida para ambos os modelos.

Abstract

This work has analyzed the capacity, on the reverse link, of code division multiple access (CDMA) systems for indoor environments. Firstly, these systems have been represented by a bidimensional model based on an array of square cells with power control performed by one amongst E nearest base stations (BS). Analytical expressions were obtained to evaluate the mean and the standard deviation of the own-cell and other-cell interference in the system. Next, we have compared these analytical values with the values empirically obtained by a Monte Carlo simulation, in order to check the accuracy of the equations. This study has been extended to a tridimensional model with three floors based on the same array of square cells, but with power control performed by the nearest BS and by the strongest BS (the BS with the best signal-to-noise ratio). When the power control performed by the strongest BS is performed, the empirical equations are obtained. The effects of parameters such as: voice activity monitoring, log-normal shadowing, wall attenuation, floor attenuation and path loss were considered. The outage probability for both models have also been evaluated.

Agradecimentos

- A Deus, por toda a ajuda dada nos momentos difíceis.
- Aos meus pais, Antônio e Inez e minha irmã Juliana pela força que me deram para superar todos os obstáculos e poder alcançar mais este objetivo em minha vida.
- Ao professor Celso, pela dedicação e paciência desprendidas ao meu trabalho nestes últimos dois anos.
- Aos Profs. Drs. Roger Pierre Fabris Hoefel - (Universidade de Santa Cruz do Sul), Renato Baldini Filho (FEEC/UNICAMP) e Jaime Portugheis (FEEC/UNICAMP), membros da Banca Examinadora.
- Aos amigos de Pós-Graduação Carlos Henrique, Getúlio e Magno, que contribuíram para a realização deste trabalho.
- Aos funcionários da secretaria de Pós-graduação, pelo apoio e dedicação.
- Aos colegas e funcionários da FEEC, pela amizade e companheirismo.
- À FAPESP pelo apoio financeiro através da bolsa de estudo.

Glossário

- Cnúmero de camadas.
- $d(x, y, L)$distância de um usuário da célula adjacente até a ERB da célula central (modelo 2D).
- $d_i(x, y, L)$distância de um usuário da célula adjacente na $i^{ésima}$ camada, até a ERB da célula central (modelo 2D).
- $d(x, y, z, L)$distância de um usuário da célula adjacente até a ERB da célula central (modelo 3D).
- $d_{i,j}(x, y, z, L)$...distância de um usuário da célula adjacente na $i^{ésima}$ camada e no $j^{ésimo}$ piso, até a ERB da célula central (modelo 3D).
- d_{zm}distância vertical entre o móvel e o piso da mesma sala.
- Enúmero de ERBs responsáveis pelo controle de potência.
- E_benergia por bit do sinal.
- ERBEstação Rádio-Base.
- ERMEstação Rádio-Móvel.
- fatenuação de piso.
- f_{dB}atenuação de piso em dB.

- Fnúmero de pisos.
- FAVfator de atividade de voz.
- FDPfunção distribuição de probabilidade.
- G_Pganho de processamento.
- haltura da sala dada em metros.
- Iinterferência total.
- \bar{I}valor médio da interferência.
- $\overline{I^2}$valor quadrático médio.
- Lmedida do lado do quadrado (sala) dado em metros.
- M_inúmero de células adjacentes na $i^{ésima}$ camada (modelo 2D).
- $M_{i,j}$número de células adjacentes na $i^{ésima}$ camada e no $j^{ésimo}$ piso (modelo 3D).
- N_0densidade espectral unilateral do ruído branco.
- Ppotência que deve chegar na ERB.
- P_Rpotência recebida.
- P_Tpotência transmitida.
- $P_{T,M}$potência transmitida por uma certa ERM.
- $P_{T,B}$potência transmitida por uma certa ERB.
- $P_{R,M}$potência recebida por uma certa ERM.
- P_Ipotência interferente proveniente da célula de um usuário.
- P_Opotência interfernte proveniente das outras células.

- P_Upotência proveniente de um usuário de referência.
- rdistância entre uma ERM e uma ERB situadas na mesma sala.
- sespaçamento entre andares dado em metros.
- VAvariável aleatória.
- zdistância vertical entre o móvel e a ERB na mesma sala.
- watenuação de parede.
- w_{dB}atenuação de parede em dB.
- αfator de atividade de voz.
- βexpoente da perda de propagação.
- γ_brelação sinal-interferência.
- γ_inúmero de paredes existentes entre a ERM da célula adjacente na $i^{ésima}$ camada, e a ERB da célula central.
- $\gamma_{i,j}$número de paredes existentes entre a ERM da célula adjacente na $i^{ésima}$ camada e no $j^{ésimo}$ piso, e a ERB da célula central.
- λ_jnúmero de pisos existentes entre a ERM da célula adjacente no $j^{ésimo}$ piso e a ERB da célula central.
- νVA log-normal que representa o sombreamento.
- ν_{equ}VA log-normal que representa o sombreamento equivalente.
- ν_dsombreamento no canal direto.
- ν_{dequ}sombreamento equivalente no canal direto.
- ν_rsombreamento no canal reverso.

- σdesvio padrão do erro no controle de potência em dB.
- $\sigma_{\nu_{dB}}$desvio padrão do sombreamento em dB.
- $\sigma_{\nu_{dB\,equ}}$desvio padrão do sombreamento equivalente em dB.
- σ_Idesvio padrão da interferência.

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Telefonia Móvel Celular	4
2.1	Evolução	4
2.2	Conceitos Básicos	7
2.2.1	Sistema	7
2.2.2	Interferência	8
2.2.3	Reuso de Freqüência	8
2.2.4	Perda de Percurso	8
2.2.5	Atenuação de Parede	9
2.2.6	Atenuação de Piso	9
2.2.7	Atividade de voz	10
2.2.8	Setorização	10
2.3	Sistemas CDMA	10
2.3.1	Introdução	10
2.3.2	Desempenho	13
2.3.3	Controle de Potência	14
2.4	Sombreamento	15
2.4.1	Gaussiana em dB	15
2.4.2	Log-Normal	15
2.4.3	Média e Desvio Padrão de uma Log-Normal	16

2.4.4	Soma de Variáveis Log-Normais	16
3	Cálculo Analítico da Interferência	19
3.1	Controle Ideal de Potência	19
3.1.1	Interferência Interna de uma Célula	19
3.1.2	Interferência Externa de uma Célula	21
3.2	Atenuação de Parede	26
3.2.1	Interferência Externa de uma Célula	27
3.3	Controle Não-Ideal de Potência e Sombreamento	30
3.3.1	Interferência Interna de uma Célula	30
3.3.2	Interferência Externa de uma Célula	34
3.4	Fator de Atividade de Voz (FAV)	45
3.4.1	Interferência Interna de uma Célula	45
3.4.2	Interferência Externa de uma Célula	47
3.5	Simulação	50
4	Cálculo Analítico da Interferência em Prédios	55
4.1	Controle Ideal de Potência	55
4.1.1	Interferência Interna de uma Célula	55
4.1.2	Interferência Externa de uma Célula	58
4.2	Atenuação de Piso	63
4.2.1	Interferência Externa de uma Célula	66
4.3	Controle de Potência realizado pela ERB mais forte	68
4.4	Simulação	71
5	Desempenho de Sistemas CDMA	83
5.1	Introdução	83
5.2	Controle Não-Ideal de Potência, Sombreamento e FAV	84

5.2.1	Modelo 2D	85
5.2.2	Modelo 3D	88
6	Conclusões	97
6.1	Introdução	97
6.2	Propostas de Trabalhos Futuros	99
A	Séries de Taylor	101
A.1	Séries de Taylor para Funções de Uma Variável	101
A.2	Séries de Taylor para Funções de Duas Variáveis	102
A.3	Séries de Taylor para Funções de Seis Variáveis	102

Lista de Figuras

2.1	Modelo de transmissor de um sistema CDMA com espalhamento espectral. .	12
2.2	Modelo de canal de um sistema CDMA com espalhamento espectral.	12
2.3	Modelo de receptor de um sistema CDMA com espalhamento espectral. . . .	13
3.1	Célula quadrada com usuários uniformemente distribuídos.	20
3.2	Célula adjacente com usuário e célula central.	22
3.3	Arranjo de células composto pelas 12 camadas mais próximas da célula central	24
3.4	Arranjo de nove células quadradas com uma ERB por sala.	29
3.5	FDP de x para controle de potência realizado por uma ERB, com $w_{dB} = 4$ dB, $\sigma_{\nu_{dB}} = 6$ dB, $\beta = 2, 5$, e $L = 10$ m.	38
3.6	FDP de x para controle de potência realizado por três ERBs, com $w_{dB} = 4$ dB, $\sigma_{\nu_{dB}} = 6$ dB, $\beta = 2, 5$, e $L = 10$ m.	39
3.7	Desvio padrão do sombreamento equivalente em dB, em função do desvio padrão do sombreamento em dB, para $E = 3$	42
3.8	Desvio padrão do sombreamento equivalente em dB, em função do número E de ERBs que participam do controle de potência.	43
3.9	Desvio padrão do sombreamento equivalente em dB, em função do desvio padrão do sombreamento em dB, parametrizado em função do número E de ERBs que participam do controle de potência.	44

3.10	Interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento, com $\beta = 2, 5$, $\alpha = 0, 4$, $w_{dB} = 4$ dB, para controle de potência realizado por uma ERB.	51
3.11	Desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento, com $\beta = 2, 5$, $\alpha = 0, 4$, $w_{dB} = 4$ dB, para controle de potência realizado por uma ERB.	52
3.12	Interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento, com $\beta = 2, 5$, $\alpha = 0, 4$, $w_{dB} = 4$ dB, para controle de potência realizado por duas e três ERBs.	53
3.13	Desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento, com $\beta = 2, 5$, $\alpha = 0, 4$, $w_{dB} = 4$ dB, para controle de potência realizado por duas e três ERBs	53
4.1	Prédio de três andares com nove salas quadradas por andar.	56
4.2	Modelo utilizado para o prédio de 3 andares com os móveis uniformemente distribuídos em cada sala.	57
4.3	Corte vertical de um prédio de 5 andares, mostrando um caminho direto e dois caminhos envolvendo dupla difração entre uma ERM (TX) e uma ERB (RX), localizadas em pisos diferentes.	64
4.4	Comparação entre o valor médio do ganho de percurso (inverso aditivo da perda) medido e calculado numa pequena área entre uma ERM e um ponto do prédio em função do número de pisos existentes entre eles. Os ganhos de percurso do raio refratado e direto são mostrados separadamente.	65
4.5	Interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento, com $\beta = 2, 5$, $\alpha = 0, 4$, $w_{dB} = 4$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado por uma ERB.	72

4.6	Desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento, com $\beta = 2,5$, $\alpha = 0,4$, $w_{dB} = 4$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado por uma ERB.	73
4.7	Interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento, com $\beta = 2,5$, $\alpha = 0,4$, $w_{dB} = 4$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.	74
4.8	Desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento, com $\beta = 2,5$, $\alpha = 0,4$, $w_{dB} = 4$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.	75
4.9	Interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento, parametrizada em função de β , para $\alpha = 0,4$, $w_{dB} = 4$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.	78
4.10	Desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento, parametrizado em função de β , para $\alpha = 0,4$, $w_{dB} = 4$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte. . . .	79
4.11	Interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento, parametrizada em função de α , para $\beta = 3$, $w_{dB} = 4$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.	80
4.12	Desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento, parametrizada em função de α , para $\beta = 3$, $w_{dB} = 4$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte. . . .	80
4.13	Interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento, parametrizada em função da atenuação de parede w_{dB} , para $\alpha = 0,4$, $\beta = 3$, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte. . . .	81

4.14	Desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento, parametrizada em função da atenuação de parede w_{dB} , para $\alpha = 0,4$, $\beta = 3$, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.	81
4.15	Interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento, parametrizada em função da atenuação de piso f_{dB} , para $\alpha = 0,4$, $\beta = 3$, $w_{dB} = 4$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.	82
4.16	Desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento, parametrizada em função da atenuação de piso f_{dB} , para $\alpha = 0,4$, $\beta = 3$, $w_{dB} = 4$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.	82
5.1	Probabilidade da perda de desempenho em função do número de usuários, parametrizada pelo fator de atividade de voz, para desvio padrão do erro do controle de potência de 1 dB, e desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{\nu_{dB}} = 7$ dB, $\beta = 3$, $w_{dB} = 4$ dB.	86
5.2	Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pelo desvio padrão do erro no controle de potência, para $\beta = 3$, do fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{\nu_{dB}} = 7$ dB, e $w_{dB} = 4$ dB.	87
5.3	Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pelo expoente da perda de percurso, para desvio padrão do erro do controle de potência de 1 dB, do fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{\nu_{dB}} = 7$ dB, e $w_{dB} = 4$ dB.	88

5.4	Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pelo desvio padrão do sombreamento, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do desvio padrão do erro do controle de potência igual a 1 dB, e $w_{dB} = 4$ dB. .	89
5.5	Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pela atenuação de parede, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do desvio padrão do erro do controle de potência igual a 1 dB, e $\sigma_{\nu_{dB}} = 7$ dB.	90
5.6	Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pelo número E de ERBs que participam do controle de potência, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do desvio padrão do erro do controle de potência igual a 1 dB, $\sigma_{\nu_{dB}} = 7$ dB e $w_{dB} = 4$ dB.	91
5.7	Probabilidade da perda de desempenho em função do número de usuários, parametrizada pelo fator de atividade de voz, para desvio padrão do erro do controle de potência de 1 dB, e desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{\nu_{dB}} = 7$ dB, $\beta = 3$, $w_{dB} = 4$ dB, e $f_{dB} = 15$ dB.	92
5.8	Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pelo desvio padrão do erro no controle de potência, para $\beta = 3$, do fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{\nu_{dB}} = 7$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, e $w_{dB} = 4$ dB.	93
5.9	Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pelo expoente da perda de propagação, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{\nu_{dB}} = 7$ dB, do desvio padrão do erro do controle de potência igual a 1 dB, $f_{dB} = 15$ dB, e $w_{dB} = 4$ dB.	93

5.10	Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pelo desvio padrão do sombreamento, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do desvio padrão do erro do controle de potência igual a 1 dB, $f_{dB} = 15$ dB, e $w_{dB} = 4$ dB.	94
5.11	Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pela atenuação de piso, para erro do controle de potência igual a 1 dB, fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{\nu_{dB}} = 7$ dB, e $w_{dB} = 4$ dB.	94
5.12	Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pela atenuação de parede, para erro do controle de potência igual a 1 dB, fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{\nu_{dB}} = 7$ dB, e $f_{dB} = 15$ dB.	95

Capítulo 1

Introdução

Comunicações sem fio em ambientes fechados têm muitas vantagens sobre os sistemas convencionais cabeados, pois eliminam o problema da fiação, reduzem os gastos com o cabeamento necessário para a conexão com os equipamentos, e facilitam a mobilidade dos usuários. Desta forma, novos "layouts" dentro do escritório podem ser criados sem a necessidade de se mudar um cabo de comunicação para a conexão com o equipamento. O uso de alguma técnica de múltiplo acesso se torna necessária e, de acordo com alguns estudos feitos para ambientes fechados, verificou-se que a técnica DS-CDMA (Direct Sequence Code Division Multiple Access) é uma das melhores a ser utilizada. Por esta e outras razões é que os objetos de estudo desta Tese são os sistemas CDMA em ambientes fechados.

Muitos trabalhos já foram realizados no sentido de se obter os parâmetros de propagação de canal para ambientes fechados [1, 2, 3, 4]. Além disso, estudos já foram feitos da capacidade de sistemas CDMA em ambientes fechados, considerando pequenas células associadas com terminais de antenas direcionais [5], onde cada terminal é composto por um arranjo de antenas. Além disso, a diversidade temporal na forma de receptores Rake também foram exploradas, fazendo com que a capacidade do sistema melhorasse em muito. Entretanto, considerarmos diversidade temporal em ambientes fechados não é muito razoável, visto que precisaríamos de taxas muito altas de transmissão para conseguirmos aumento na diversidade, o que não acontece na prática, pois como em ambientes fechados a dimensão das salas geralmente é pequena, os múltiplos percursos que aparecem na propagação do sinal se tornam

muito próximos uns dos outros, e dessa forma não se consegue separá-los. Apesar de bons, os resultados encontrados nesses trabalhos que realizaram a análise desses sistemas CDMA foram obtidos através de simulação. Em simulação, parâmetros como, expoente da perda de propagação, desvio padrão do sombreamento, fator de atividade de voz, etc são mantidos fixos, e dessa forma para cada nova situação que se queira analisar uma nova simulação precisa ser realizada, o que acaba se tornando indesejável, pois devido a complexidade geralmente encontrada em simuladores de sistemas CDMA, o tempo de execução de uma análise é grande, e dessa forma, uma análise completa que inclui a análise de vários parâmetros levaria muito tempo.

A vantagem de se obter expressões analíticas para o cálculo da interferência e do desvio padrão dessa interferência, que possam descrever com fidelidade o comportamento obtido através de simulação é muito grande, entre as quais podemos citar a facilidade na análise do sistema já que não é necessário construir um simulador, o que devido a sua dimensão é sempre um trabalho complexo. Entretanto, existem casos em que, devido a complexidade do sistema, torna-se muito difícil obter essas expressões. Portanto, é interessante considerar os dois métodos de análise, ou seja, simulação e expressões. Esta Tese apresenta expressões analíticas, para o enlace reverso, tanto para a interferência interna, quanto para a externa, e para várias situações, tais como: ausência ou presença de sombreamento, imperfeição no controle de potência, monitoração da atividade de voz, atenuação de parede, e atenuação de piso. A partir do cálculo desta interferência, a probabilidade de perda de desempenho de um sistema CDMA ("Outage Probability") para essas várias situações mencionadas é calculada.

Esta Tese está organizada da seguinte maneira: O capítulo 2 apresenta uma revisão dos principais conceitos que foram utilizados no trabalho, tais como, sistemas CDMA, controle de potência, atenuação de parede, atenuação de piso, atividade de voz, e sombreamento log-normal. No capítulo 3, expressões analíticas do valor médio do sinal e da interferência proveniente da própria e de outras células, para situações como: presença de sombreamento, monitoração da atividade de voz, atenuação de parede e diferentes expoentes da perda de

percurso considerando-se um ambiente interno de duas dimensões são obtidas. No capítulo 4 também são obtidas expressões analíticas do valor médio do sinal e da interferência proveniente da própria célula e de outras, onde o ambiente interno considerado é modelado em três dimensões. Por causa destas três dimensões, as expressões analíticas tornam-se mais complicadas neste capítulo e dessa forma ao invés de uma aproximação teórica (utilizada no capítulo 3), utiliza-se uma aproximação baseada em dados empíricos para a obtenção das equações. No capítulo 5 é obtido o desempenho analítico de sistemas CDMA na forma da probabilidade de perda de desempenho. No capítulo 6 são feitas as conclusões acerca deste trabalho. No apêndice do trabalho foram obtidas expressões para a representação de uma função de seis variáveis através de série de Taylor.

Capítulo 2

Telefonia Móvel Celular

2.1 Evolução

No final da década de 40, o uso do espectro de radio frequência era dominado pelas companhias de radio e televisão, embora outras aplicações já vinham sendo utilizadas. Foi então que surgiu o primeiro serviço público de telefonia móvel nos EUA (Estados Unidos da América), que utilizava a tecnologia analógica. Nesse sistema, uma única célula era utilizada para cobrir uma região metropolitana inteira, utilizando-se transmissores de alta potência localizados em torres, ou em prédios altos, cobrindo distâncias de até 50 km [4]

Esse sistema apresentava muitas limitações, pois como as células eram muito grandes, o número de usuários que poderiam estar conversando ao mesmo tempo nessa enorme área de cobertura era fixo e pequeno, além disso, a qualidade de serviço não era boa, o que fazia deste, um sistema de capacidade muito baixa.

Assim, durante as décadas de 50 e 60, a AT&T ("American Telegraph and Telephony") Bell Laboratories e outras companhias de telecomunicações em todo mundo concentraram seus esforços no desenvolvimento de novas técnicas, baseadas no conceito de dividir aquela enorme área de cobertura em células menores. Esta divisão possibilitaria o reuso de porções do espectro, aumentando assim a eficiência espectral e consequentemente o número de usuários atendidos.

Esta idéia básica de alocação e reuso espectral foi baseada no sistema utilizado para rádio e TV, onde os canais alocados para rádio e TV em uma determinada região eram reutilizados

em outras regiões cuja distância fosse suficientemente grande para que a interferência fosse desprezível. Em 1971 o Bell System mostrou a viabilidade de um sistema móvel celular. Isso ocorreu devido aos avanços da indústria eletrônica, pois começava a era dos microprocessadores e minicomputadores usados para controlar funções mais complexas que até aquele momento não eram possíveis [6].

Em 1983, o FCC ("Federal Communications Committee") finalmente alocou na portadora de 800 MHz, 40 MHz de espectro, correspondendo a 666 canais "full-duplex" de 30 kHz, a ser utilizada pelo sistema AMPS, que se tornou operacional neste mesmo ano. Este foi o primeiro serviço analógico largamente empregado na década de 80 utilizando uma técnica de múltiplo acesso denominada de FDMA ("Frequency Division Multiple Access"), onde diferentes canais são separados em bandas de frequência diferentes. De acordo com as regras do FCC, cada cidade podia ter apenas duas operadoras de telefonia celular, havendo assim um certo nível de concorrência.

Em 1989, o FCC reservou mais 166 canais (10 MHz), para acomodar a demanda que vinha aumentando bastante. Com esse crescente aumento anual de usuários e devido às limitações impostas pelo sistema, não havia outra alternativa a não ser criar um outro sistema capaz de vencer estes problemas. Assim surgiram os sistemas de segunda geração, que utilizavam tecnologia digital.

O primeiro sistema digital americano, U.S. Digital Cellular (USDC), surgiu em 1991. Ao invés de colocar apenas um usuário na banda de 30 kHz, esse novo sistema colocava três usuários, proporcionando um aumento considerável de capacidade. Uma outra técnica de múltiplo acesso denominada de TDMA ("Time Division Multiple Access"), onde os diferentes canais são separados no tempo, era utilizada. Em 1992, a WARC ("World Administrative Radio Commission") da ITU ("International Telecommunications Union") formulou um plano de implementar uma banda de frequência global em 2000 MHz, que seria utilizado por todos os países. Estavam surgindo assim as idéias para a terceira geração (3G). Este conceito originalmente conhecido como FPLMTS ("Future Public Land Mobile Telephone Systems"),

foi renomeado para IMT-2000 ("International Mobile Telecommunications-2000") em 1995.

Enquanto isso, em 1993, surgia um outro tipo de sistema digital baseado na técnica de múltiplo acesso por divisão por códigos, denominada de CDMA ("Code Division Multiple Access"), que foi desenvolvido pela Qualcomm, Inc. e padronizada pela TIA ("Telecommunications Industry Association") como o padrão IS-95. Neste novo sistema, os usuários utilizam portadoras com largura de faixa de 1,25 MHz através do uso de seqüências que são responsáveis pelo espalhamento espectral do sinal.

Em busca dos ideais da 3G, em 1998 o ITU recebeu 15 propostas de IMT-2000 de governos e indústrias envolvidas neste ramo de telecomunicações em todo o mundo. A maioria das propostas incluía alguma forma de CDMA no protocolo da interface aérea. O ETSI ("European Telecommunications Standards Institute") desenvolveu o UMTS ("Universal Mobile Telecommunications System") como um caminho para a evolução do GSM ("Global System for Mobile Communication"). O UTRA ("UMTS Terrestrial Radio Access") utiliza o W-CDMA ("Wideband-CDMA"), cuja tecnologia possibilita a integração com a tecnologia GSM. Outra proposta foi o UWC-136 ("Universal Wireless Communications"), que seria responsável pelo caminho evolutivo da tecnologia TDMA (IS-136) e GSM.

Os EUA propuseram o chamado CDMA2000, que seria compatível com os sistemas IS-95, só que agora suportaria uma taxa de chip 12 vezes maior do que a atual taxa de 1,2288 Mchip/s, permitindo uma maior capacidade ao sistema e transmissões em taxas mais altas. Isso possibilitaria a transmissão de dados e outros serviços não viáveis nos sistemas de segunda geração.

Entretanto, em virtude do sucesso de todos os sistemas digitais criados até o momento, tais como, GSM, TDMA, CDMA, etc, a escolha de um sistema único para a terceira geração vem se tornando uma tarefa cada vez mais difícil.

2.2 Conceitos Básicos

2.2.1 Sistema

Em um sistema celular, três elementos estão sempre presentes, as células, as Estações Rádio-Móveis (ERMs), e as Estações Rádio-Base (ERBs). Em ambientes externos, uma célula é definida como sendo uma região, idealmente circular, cuja cobertura é feita por uma ERB que trabalha ou com uma antena omni-direcional, ou com antenas direcionais de 120^0 se utilizada a setorização. Em ambientes fechados, essa geometria muda um pouco, pois passam a existir obstáculos muito grandes ao sinal, por exemplo as paredes, e estas por sua vez acabam delimitando a geometria da célula que passa a ser quadrada ou retangular. Dentro de cada célula operam um determinado número de ERMs, determinado pela capacidade do sistema. Essas ERMs trabalham com antenas omni-direcionais e transmitem e recebem informação da ERB através dos diversos canais específicos de cada tipo de sistema (TDMA, CDMA, GSM, etc).

Outras células também podem estar presentes no sistema, e são chamadas de células adjacentes, operando da mesma forma com suas próprias ERMs. Um conceito muito importante em sistemas móveis é o chamado processo de "handoff". Isto acontece quando uma ERM se move de uma célula para uma outra célula adjacente enquanto uma conversação está ocorrendo. Neste processo, a ERM passa a se comunicar com as ERBs das duas células para que se encontre um canal de conversação na nova célula de forma que a ligação não termine, e ao mesmo tempo se libere o canal que estava sendo utilizado na outra célula possibilitando a utilização do mesmo por outro usuário.

Quando a transmissão do sinal ocorre da ERB para a ERM, chama-se este canal de canal direto (ou "downlink"), enquanto que quando a transmissão ocorre da ERM para a ERB esse canal é chamado de canal reverso (ou "uplink"), que será o canal de interesse neste trabalho.

2.2.2 Interferência

Chamamos de interferência qualquer potência que atinge um determinado receptor e é indesejável. Quando essa potência indesejável é proveniente dos usuários de dentro da própria célula, nós denominaremos de interferência interna, e quando ela é proveniente dos usuários das células adjacentes nós denominaremos de interferência externa. Quando a interferência externa é proveniente de células que utilizam a mesma frequência de portadora utilizada na célula em questão, essa interferência é denominada de interferência co-canal.

2.2.3 Reuso de Frequência

O reuso de frequência é um conceito muito importante em sistemas celulares móveis, pois possibilita uma maior eficiência espectral para o sistema. A cada ERB é especificado um determinado número de canais a serem utilizados pelos usuários dessa mesma célula. Esses canais trabalham em certas frequências, que são as frequências da portadora. A mesma coisa acontece com as células adjacentes, e desta forma, sem o reuso de frequência teríamos um número muito grande de portadoras para cobrir uma certa área que possuísse muitas células. Assim, para resolver este problema, a mesma frequência de portadora é utilizada por duas células, cuja distância entre elas seja suficiente para que a interferência que irá existir (interferência co-canal) por estarem usando os mesmos canais seja pequena e não prejudique a capacidade do sistema. Em sistemas TDMA geralmente se utiliza um reuso de frequência igual a 7, diferentemente de sistemas CDMA, onde esse fator é igual a 1 e os canais são determinados pelos códigos dados a cada usuário.

2.2.4 Perda de Percurso

Um modelo bastante simples, mas muito utilizado para modelar a propagação de um sinal transmitido de um determinado ponto a outro, cuja distância é d , será utilizado neste trabalho. Quando um sinal é transmitido de um certo ponto e com uma certa potência a um outro ponto, essa distância percorrida pelo sinal até atingir o seu destino faz com que o

sinal apresente a perda devido ao percurso, que de acordo com este modelo, cresce com uma potência β da distância, ou seja:

$$\frac{P_R}{P_T} = d^{-\beta} \quad (2.1)$$

onde P_R é a potência recebida, P_T é a potência transmitida, d é a distância entre o transmissor e o receptor, e β é o expoente da perda de propagação. O expoente da perda de propagação é um dos parâmetros que apresenta uma grande variação em ambientes internos, com valores que vão desde $\beta = 1,8$ no caso de termos a propagação ao longo de um corredor, até $\beta = 6,7$ no caso de propagação em um ambiente com muitas obstruções e grande presença de superfícies metálicas [2].

2.2.5 Atenuação de Parede

A atenuação de parede é fundamental no cálculo da interferência para ambientes fechados, pois além da perda que o sinal sofre com a distância, ao ter que atravessar uma parede o sinal sofre outra perda que é bastante considerável, fazendo com que a interferência que vai chegar num determinado usuário ou ERB seja diminuída, melhorando assim a capacidade do sistema. Esta atenuação sofrida pelo sinal é proporcional ao número de paredes que ele passa até atingir o destino. Muitas medições já foram feitas, e as perdas vão desde 1,5 dB no caso de hangares que não apresentam estruturas internas, até 12 dB no caso de paredes espessas construídas com tijolos e concreto reforçado com aço [1, 2, 3].

2.2.6 Atenuação de Piso

Assim como a atenuação de parede, a atenuação de piso é também fundamental para o cálculo da interferência quando tratamos de ambientes internos que apresentam mais de um andar, pois além de paredes, estes ambientes apresentam pisos entre seus andares e estes oferecem perdas ao sinal, fazendo com que a interferência causada a uma ERB ou a um usuário seja ainda menor. Algumas medições já foram realizadas e verificou-se que esse fator também varia muito, não só com o tipo de material empregado mas também com a

frequência. Esse fator diminui com o aumento da frequência utilizada na comunicação dos móveis. Como consideramos uma frequência fixa neste trabalho, este fato não é relevante, pois os valores considerados para a atenuação de piso já levam em conta o valor de frequência escolhido. Essa atenuação apresenta valores que variam de 10 a 30 dB[4], dependendo do tipo do material empregado na construção, dos obstáculos colocados dentro desses pisos como dutos, encanamentos, etc., e também da finalidade para qual o prédio foi construído (comercial, residencial, etc).

2.2.7 Atividade de voz

Em sistemas CDMA a monitoração da atividade de voz é muito utilizada através de vocoders que conseguem identificar quando um determinado usuário está falando, ou quando ele está em silêncio. Assim consegue-se minimizar a interferência causada pelo mesmo e consequentemente aumentar a capacidade do sistema. Os usuários falam em média aproximadamente entre 30 a 60% do tempo, e por esta razão a voz é modelada com uma atividade média entre $0,3 \leq \alpha \leq 0,6$.

2.2.8 Setorização

A técnica de setorização consiste em se dividir uma célula em setores de modo que a interferência diminua, e dessa forma, mais usuários possam ser inseridos no sistema. Para isto são empregadas antenas direcionais nas ERBs. No nosso trabalho, não estamos considerando setorização por acreditarmos ser esta uma técnica desnecessária de se realizar em ambientes fechados, devido a pequena dimensão das salas.

2.3 Sistemas CDMA

2.3.1 Introdução

A técnica de múltiplo acesso denominada de CDMA ("Code Division Multiple Access"), é baseada na técnica de espalhamento espectral, que consiste em se combinar o sinal de

informação com um código, cuja taxa de bits é bem superior. O resultado é um espalhamento espectral do sinal de informação em uma banda muito maior que o espectro original.

Sabe-se que a largura de faixa ocupada por um sinal digital é função direta de sua taxa de bits. Quanto maior a taxa, maior a largura de banda necessária, desde que se mantenha o mesmo tipo de modulação. Partindo deste princípio, a tecnologia de espalhamento espectral alarga o espectro do sinal de informação, fazendo-se uma multiplicação do sinal de informação por uma seqüência pseudo-aleatória que varia muito mais rapidamente no tempo. O resultado é o sinal de informação com uma banda muito mais larga que a banda original. Suponhamos que T_b seja o tempo de duração da transmissão de um bit de informação do sinal, e T_c (denominado de "chip") seja o tempo de duração de um pulso retangular antipodal da seqüência escolhida para a multiplicação. Chamamos de fator de expansão da banda, ou ganho de processamento a relação:

$$G_P = \frac{T_b}{T_c} = \frac{W}{R_b} \quad (2.2)$$

onde W é a banda do sinal e R_b é a taxa de bits do sinal digital transmitido.

Na recepção, a única forma de se recuperar a informação é realizando novamente a operação de multiplicação do sinal espalhado com a mesma seqüência pseudo-aleatória.

As seqüências pseudo-aleatórias escolhidas para identificar cada usuário devem ser tais que a correlação cruzada entre elas deve ser pequena. Assim, na demodulação, após a correlação da seqüência pseudo-aleatória gerada no receptor com o sinal recebido, ocorre a contração espectral do sinal transmitido para aquele móvel, enquanto que o espectro da interferência e do ruído são espalhados ainda mais. Vale lembrar que é necessário que haja sincronismo entre o sinal recebido e a seqüência gerada no receptor.

Assim, quando um filtro passa-baixas é utilizado ele consegue remover a maior parte desta interferência, e desta forma a relação sinal-interferência cresce. Através das Fig 2.1, Fig. 2.2 e Fig. 2.3 podemos verificar de maneira simplificada transmissor, canal e receptor CDMA utilizando-se da técnica de espalhamento espectral.

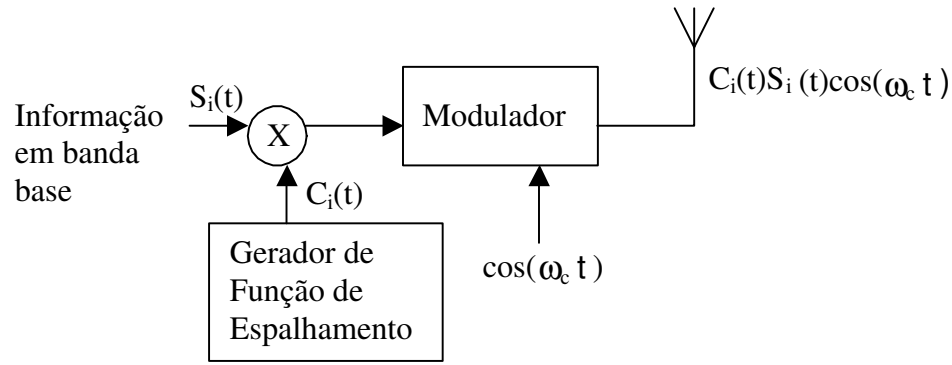


Figura 2.1: Modelo de transmissor de um sistema CDMA com espalhamento espectral.

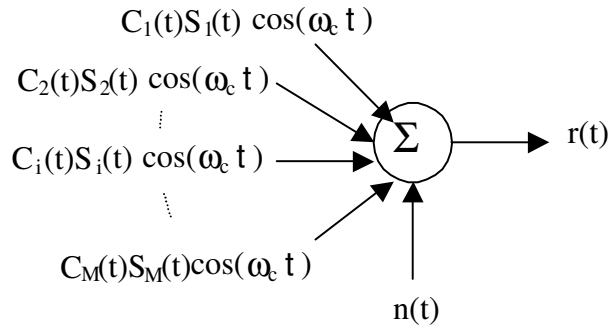


Figura 2.2: Modelo de canal de um sistema CDMA com espalhamento espectral.

Em sistemas CDMA, a qualidade de sinal é medida através da razão entre a energia por bit e a densidade espectral de potência dos sinais interferentes mais o ruído térmico ($E_b/(I_0 + N_0)$). Por esta razão, o controle de potência torna-se um fator indispensável. O objetivo do controle de potência no canal reverso (móvel para a ERB), é o de igualar a potência dos sinais recebidos de todos os móveis de uma mesma célula na ERB, ou seja, resolver o problema do efeito perto-longe ("near-far"). Através do canal direto, a ERB informa o móvel se ele deve aumentar, ou diminuir a potência que está sendo transmitida.

Os sinais transmitidos por um móvel devem chegar à ERB com a mesma potência, independente de sua posição e portanto de sua perda de percurso, para se obter uma melhor qualidade. Se o sinal de um dado móvel apresentar uma $E_b/(I_0 + N_0)$ menor do que o necessário, a qualidade da comunicação estará comprometida e, caso contrário se $E_b/(I_0 + N_0)$ for maior

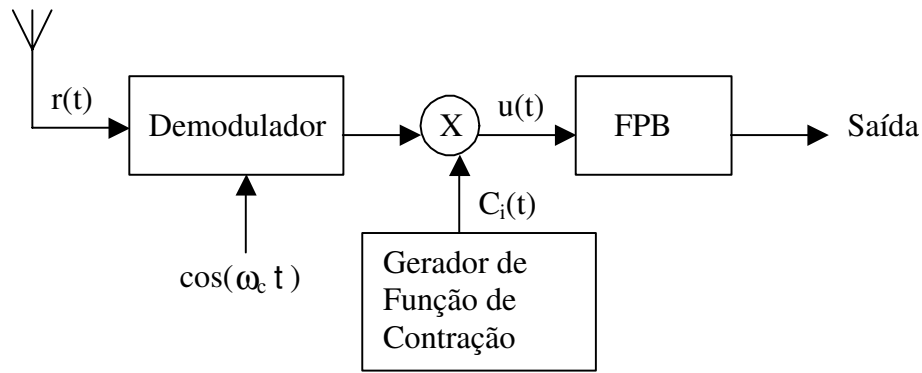


Figura 2.3: Modelo de receptor de um sistema CDMA com espalhamento espectral.

que o necessário, este móvel poderá causar interferência excessiva nos demais usuários. Portanto, um controle de potência imperfeito causa redução na capacidade do sistema. No enlace direto, o controle de potência visa reduzir o nível de potência dos móveis que estejam próximos da ERB, com pouca mobilidade e pequeno desvanecimento, ou sombreamento. Isto permite que uma maior potência seja alocada aos móveis não submetidos a estas situações, ou seja, mais distantes da ERB.

2.3.2 Desempenho

No enlace reverso de um sistema CDMA unicelular com controle de potência ideal, a relação sinal-interferência recebida na antena da ERB, devido a um usuário é dada por:

$$\frac{C}{I} = \frac{P}{(N-1)P} = \frac{1}{N-1} \quad (2.3)$$

onde P é a potência que chega na ERB devido a qualquer ERM, e N é o número de ERMs na célula.

Um sistema CDMA é limitado por interferência, visto que o ruído térmico aditivo é em geral, considerado desprezível em relação à interferência. Após a contração espectral, temos que a relação sinal-interferência pode ser escrita como:

$$\gamma_b = \frac{E_b}{I_0} = \frac{\frac{P}{B}}{\frac{(N-1)P}{W}} = \frac{\frac{W}{B}}{N-1} = \frac{G_P}{N-1} \quad (2.4)$$

onde G_P é o ganho de processamento, B é a largura espectral do sinal original, W é a largura

espectral do sinal espalhado, assim, $\frac{P}{B}$ e $\frac{(N-1)P}{W}$ são a energia do sinal e da interferência após a contração espectral, respectivamente.

Se incluirmos o ruído branco aditivo na expressão anterior teremos:

$$\gamma_b = \frac{G_P}{(N-1) + \frac{N_0}{P}} \quad (2.5)$$

onde N_0 é a densidade espectral unilateral do ruído branco.

Isolando o número de usuários na expressão anterior temos:

$$N = \frac{G_P}{\gamma_b} + 1 - \frac{N_0}{P} \quad (2.6)$$

Pela expressão acima podemos notar que a capacidade do sistema é diretamente proporcional ao ganho de processamento, e inversamente proporcional à relação sinal-interferência, γ_b . Assim, pode-se melhorar a capacidade do sistemas de duas formas, diminuindo γ_b através da utilização de códigos corretores de erros, ou através de uma modulação mais eficaz, ou aumentando G_P o que acarretaria em um aumento da largura de faixa utilizada.

Se considerarmos que o sistema utiliza a monitoração da atividade de voz , a expressão acima sofreria uma pequena alteração, e teríamos:

$$N = \frac{G_P}{\alpha \gamma_b} + 1 - \frac{N_0}{\alpha P} \quad (2.7)$$

onde α representa o valor médio da atividade vocal.

2.3.3 Controle de Potência

Conforme já mencionamos anteriormente, o controle de potência em sistemas CDMA é fundamental para que haja melhor qualidade no sistema. A potência transmitida pelas ERMs no canal reverso tem que ser controlada, para que a potência devido às ERMs que chega na ERB seja a mesma. Infelizmente, isso não ocorre na prática, pois devido à imperfeição em se estimar o desvanecimento e o sombreamento acabam existindo alguns erros. Na literatura, esse erro é modelado como uma variável log-normal, com média nula e desvio padrão de 1 a 2 dB.

2.4 Sombreamento

2.4.1 Gaussiana em dB

O sombreamento é outro fator fundamental a ser considerado em sistemas móveis celulares e é causado por obstáculos que estejam presentes nas cercanias do receptor, tais como, vegetação, relevo, etc. O sombreamento faz com que o sinal recebido apresente uma pequena flutuação em torno do valor nominal, sendo que esta flutuação varia lentamente com o tempo e pouco com a distância. Assim, podemos modelá-lo como uma incerteza em torno do valor nominal, obtido a partir da perda de percurso. O sombreamento é modelado na literatura como sendo uma variável aleatória (VA) Gaussiana medida em dB, e que tem média nula e desvio padrão entre $5 \leq \sigma_{dB} \leq 12$ dB. Desta forma, podemos escrever que:

$$p(g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{dB}} \exp \left[-\frac{(g - m_{dB})^2}{2\sigma_{dB}^2} \right] \quad (2.8)$$

onde g representa esta flutuação de potência e é dada em dB.

2.4.2 Log-Normal

Para obtermos a distribuição conhecida como log-normal, usamos a transformação $\nu = 10^{\frac{g}{10}}$, e assim teremos:

$$p(\nu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\log}\nu} \exp \left[-\frac{(\ln(\nu) - m_{\log})^2}{2\sigma_{\log}^2} \right] \quad (2.9)$$

onde m_{\log} é a média logarítmica e σ_{\log} é o desvio padrão logarítmico, dados por:

$$\begin{aligned} m_{\log} &= \int_0^{\infty} \ln(\nu) p(\nu) d\nu \\ \sigma_{\log} &= \sqrt{\int_0^{\infty} \ln^2(\nu) p(\nu) d\nu - \left[\int_0^{\infty} \ln(\nu) p(\nu) d\nu \right]^2} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Note que o domínio da log-normal é de 0 a ∞ , ao contrário da gaussiana que é de $-\infty$ a ∞ .

A média e o desvio padrão em dB relacionam-se com a média e o desvio padrão logarítmicos

através de:

$$\begin{aligned} m_{dB} &= m_{\log} \frac{10}{\ln(10)} \\ \sigma_{dB} &= \sigma_{\log} \frac{10}{\ln(10)} \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.4.3 Média e Desvio Padrão de uma Log-Normal

Para obtermos a média e o desvio padrão lineares da log-normal, vamos inicialmente escrever o valor médio e o valor quadrático médio:

$$m_l = \int_0^\infty \nu p(\nu) d\nu = \exp(m_{\log} + \frac{\sigma_{\log}^2}{2}) \quad (2.12)$$

$$\overline{\nu^2} = \int_0^\infty \nu^2 p(\nu) d\nu = \exp(2m_{\log} + 2\sigma_{\log}^2) \quad (2.13)$$

De posse do valor quadrático médio, podemos obter o desvio padrão linear da log-normal:

$$\sigma_l = \sqrt{\int_0^\infty \nu^2 p(\nu) d\nu - [\int_0^\infty \nu p(\nu) d\nu]^2} = \sqrt{\exp(2m_{\log} + \sigma_{\log}^2)[\exp(\sigma_{\log}^2) - 1]} \quad (2.14)$$

Se quisermos obter a média e o desvio padrão logaritmico a partir da média e desvio padrão lineares, podemos utilizar a seguinte transformação:

$$m_{\log} = \ln\left(\frac{m_l^2}{\sqrt{m_l^2 + \sigma_l^2}}\right) \quad (2.15)$$

$$\sigma_{\log} = \sqrt{\ln\left(\frac{\sigma_l^2}{m_l^2} + 1\right)} \quad (2.16)$$

E desta forma, basta utilizarmos as transformações usadas em (2.11) e (2.15) ou (2.16) para obtermos a média e desvio padrão em dB.

2.4.4 Soma de Variáveis Log-Normais

Nos capítulos seguintes iremos precisar somar variáveis cuja distribuição é log-normal. De acordo com Fenton [7], a soma de N variáveis log-normais identicamente distribuídas com desvio padrão menor que 4 dB é aproximadamente uma log-normal com média e desvio

padrão dados por:

$$m_{log} = \ln(N) + 2m_{log} + 2\sigma_{log}^2 - \frac{1}{2} \ln\left[\frac{N-1}{N} + \frac{1}{N} \exp(4\sigma_{log}^2)\right] \quad (2.17)$$

$$\sigma_{log} = \sqrt{\left[\frac{1}{N} \exp(4\sigma_{log}^2) + \frac{N-1}{N}\right]} \quad (2.18)$$

Este resultado nos permite afirmar que a soma de 2 variáveis log-normais independentes com média e variância diversas também tem distribuição log-normal. Este resultado foi usado no capítulo 5 e se mostrou satisfatório. A média e desvio padrão da soma de duas variáveis log-normais são dados por:

$$m_{l,\Sigma} = m_{l,1} + m_{l,2} \quad (2.19)$$

$$\sigma_{l,\Sigma} = \sqrt{\sigma_{l,1}^2 + \sigma_{l,2}^2} \quad (2.20)$$

Capítulo 3

Cálculo Analítico da Interferência

Neste capítulo iremos apresentar o cálculo analítico da interferência para a obtenção do seu valor médio e desvio padrão. Para isso será utilizado um modelo bidimensional tanto para a descrição da localização dos móveis como para a localização das ERBs. O controle de potência é realizado pela ERB mais próxima e dois casos serão analisados: controle de potência realizado por uma ERB, e controle de potência realizado por E ERBs.

Após a obtenção desses valores analíticos, uma comparação com os valores obtidos por simulação será feita para verificar a eficácia das equações obtidas. Parâmetros como, sombreamento, monitoração da atividade de voz e atenuação de parede são considerados na modelagem do sistema.

Por este trabalho ser uma continuação dos estudos feitos na referência [8], só que agora para ambientes fechados, muitas passagens apresentadas na referência [8] foram utilizadas e adaptadas com o intuito de facilitar a comparação entre os dois tipos de ambientes.

3.1 Controle Ideal de Potência

3.1.1 Interferência Interna de uma Célula

Considere uma célula quadrada de lado L com N ERMs uniformemente distribuídas dentro da mesma, conforme mostra a Fig. 3.1. Utilizando coordenadas cartesianas para descrever a posição da ERM dentro da célula, nós podemos obter as funções densidade de probabilidade

para a abscissa e ordenada, e desta forma temos:

$$p(x) = \frac{1}{L} \quad (3.1)$$

$$p(y) = \frac{1}{L} \quad (3.2)$$

onde $-\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}$, $-\frac{L}{2} \leq y \leq \frac{L}{2}$.

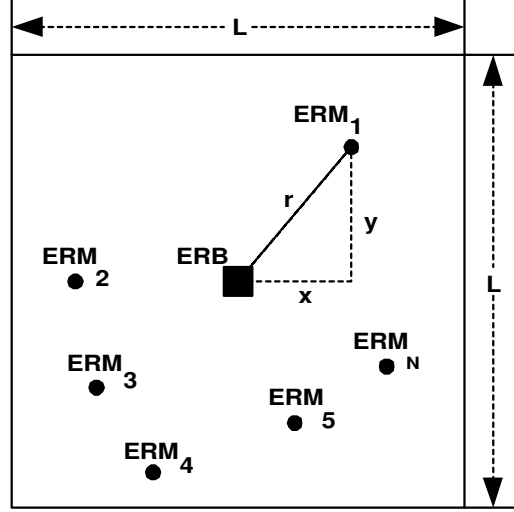


Figura 3.1: Célula quadrada com usuários uniformemente distribuídos.

Considere que no centro de cada célula está situada uma ERB. Considere a potência que chega na ERB, devido a uma ERM situada na mesma célula, desconsiderando-se o sombreamento, dada por:

$$P = P_{T,M} r^{-\beta} \quad (3.3)$$

onde $P_{T,M}$ é a potência transmitida por uma ERM que se situa a uma distância r da ERB da sua célula, onde $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, β é o expoente de perda de propagação, que para ambientes internos, se situa no intervalo $1,8 \leq \beta \leq 6,7$.

Supondo que a ERB realiza controle de potência ideal sobre as ERMs, temos que cada ERM deve transmitir com uma potência $P r^\beta$, onde P é a potência que deverá chegar na ERB, compensando a perda de propagação.

Desta forma, a interferência total que chega em uma ERB devido aos $N - 1$ usuários

interferentes que operam na própria célula é determinística e vale $I = (N - 1)P$, que se escrevermos de outra forma, teremos a interferência normalizada por usuário por Watt,

$$\frac{I}{(N - 1)P} = 1 \quad (3.4)$$

3.1.2 Interferência Externa de uma Célula

Considere uma célula adjacente também quadrada de lado L , cujo centro dista L do centro da célula principal, conforme mostra a Fig. 3.2. Considere N ERMs uniformemente distribuídas nesta célula adjacente. Considere também que a ERB desta célula adjacente, realiza controle de potência ideal sobre os usuários de sua célula. Assim, P é a potência que chega na ERB da célula adjacente, devido a um usuário de sua própria célula.

Porém, a potência que chega na ERB da célula central, devido a um usuário da célula adjacente é dada por:

$$P r^\beta d^{-\beta}(x, y, L) \quad (3.5)$$

onde $d(x, y, L)$ é a distância de um usuário da célula adjacente até a ERB da célula central, e r é a distância de um usuário da célula adjacente até a ERB da mesma célula, conforme mostra a Fig. 3.2.

Podemos notar que:

$$d(x, y, L) = \sqrt{x^2 + (L + y)^2} \quad (3.6)$$

A interferência devido aos N usuários na ERB central é dada por:

$$\frac{I}{P} = r_1^\beta d_1^{-\beta}(x_1, y_1, L) + \cdots + r_N^\beta d_N^{-\beta}(x_N, y_N, L) \quad (3.7)$$

Desta forma, a interferência média na ERB da célula central, é obtida descondicionando-a pelas localizações x e y do usuário:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{I}}{P} = & \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \cdots \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \left[r_1^\beta d_1^{-\beta}(x_1, y_1, L) + \cdots + r_N^\beta d_N^{-\beta}(x_N, y_N, L) \right] p(x_1)p(y_1) \\ & \cdots p(x_N)p(y_N) dx_1 dy_1 \cdots dx_N dy_N \end{aligned} \quad (3.8)$$

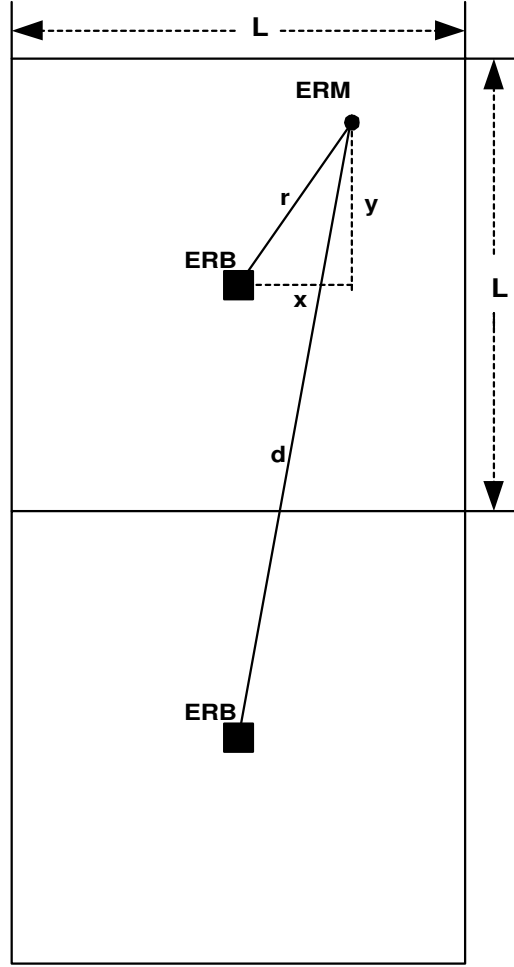


Figura 3.2: Célula adjacente com usuário e célula central.

Como as variáveis x e y de localização do usuário são estatisticamente independentes e identicamente distribuídas, temos que:

$$\frac{\bar{I}}{P} = N \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{\beta} d^{-\beta}(x, y, L) p(x) p(y) dx dy \quad (3.9)$$

Vale lembrar que podem existir até M_i células adjacentes na $i^{\text{ésima}}$ camada, onde cada camada apresenta uma certa distância entre o centro da célula central e o das respectivas células adjacentes. Assim, podemos escrever a interferência média normalizada como:

$$\frac{\bar{I}}{NP} = \sum_{i=1}^C M_i \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{\beta} d_i^{-\beta}(x, y, L) p(x) p(y) dx dy \quad (3.10)$$

i	$d_i(x, y, L)$	M_i	i	$d_i(x, y, L)$	M_i
1	$\sqrt{x^2 + (L + y)^2}$	4	7	$\sqrt{(L + x)^2 + (3L + y)^2}$	8
2	$\sqrt{(L + x)^2 + (L + y)^2}$	4	8	$\sqrt{(2L + x)^2 + (3L + y)^2}$	8
3	$\sqrt{x^2 + (2L + y)^2}$	4	9	$\sqrt{x^2 + (4L + y)^2}$	4
4	$\sqrt{(L + x)^2 + (2L + y)^2}$	8	10	$\sqrt{(L + x)^2 + (4L + y)^2}$	8
5	$\sqrt{(2L + x)^2 + (2L + y)^2}$	4	11	$\sqrt{(3L + x)^2 + (3L + y)^2}$	4
6	$\sqrt{x^2 + (3L + y)^2}$	4	12	$\sqrt{(2L + x)^2 + (4L + y)^2}$	8

Tabela 3.1: Distância d_i entre a ERB central e uma das ERBs da i^{esima} camada e o número de células adjacentes que a compõem.

onde $d_i(x, y, L)$ é a distância de um usuário da célula adjacente na i^{esima} camada até a ERB da célula central, cujos valores podem ser vistos na Tabela 3.1, bem como o número de células adjacentes que compõe cada camada, e C é o número de camadas.

Substituindo as FDP (Função Densidade de Probabilidade) de x e y , teremos:

$$\frac{\bar{I}}{NP} = \sum_{i=1}^C M_i \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_i^{-\beta}(x, y, L) dx dy \quad (3.11)$$

Podemos visualizar esse arranjo de células formado por 12 camadas através da Fig. 3.3, onde a célula central é representada pela célula que está hachurada e os números existentes no centro de cada quadrado representam a camada à qual a célula pertence.

Com $C = 12$ podemos verificar um total de 69 salas, o que é um número bastante grande se compararmos ao que normalmente encontramos em um ambiente fechado, como por exemplo, em um prédio comercial. Além disso, devido a presença das paredes, poderemos verificar posteriormente através de tabelas que a interferência externa proveniente de células situadas em camadas superiores a $C = 5$ será desprezível. Dessa forma, considerar 12 camadas na modelagem do nosso sistema é suficiente na obtenção da interferência externa.

De forma análoga, podemos escrever o valor quadrático médio como:

$$\begin{aligned} \frac{\overline{I^2}}{P^2} &= \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \cdots \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \left[r_1^\beta d_1^{-\beta}(x_1, y_1, L) + \cdots + r_J^\beta d_J^{-\beta}(x_J, y_J, L) \right]^2 \\ &\quad \times p(x_1) \cdots p(x_J) p(y_1) \cdots p(y_J) dx_1 \cdots dx_J dy_1 \cdots dy_J \end{aligned} \quad (3.12)$$

onde as posições x e y são independentes entre os usuários, e $J = N \sum_{i=1}^C M_i$ é o número

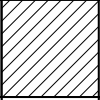
			12	10	9	10	12		
		11	8	7	6	7	8	11	
12	8	5	4	3	4	5	8	12	
10	7	4	2	1	2	4	7	10	
9	6	3	1		1	3	6	9	
10	7	4	2	1	2	4	7	10	
12	8	5	4	3	4	5	8	12	
		11	8	7	6	7	8	11	
			12	10	9	10	12		

Figura 3.3: Arranjo de células composto pelas 12 camadas mais próximas da célula central

total de móveis nas diversas células das diversas camadas.

Distribuindo-se o quadrado na equação anterior, e lembrando-se que as N variáveis do tipo r e d têm distribuição idêntica, temos:

$$\begin{aligned}
\frac{\overline{I^2}}{\overline{P^2}} &= N \sum_{i=1}^C M_i \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{2\beta} d_i^{-2\beta}(x, y, L) p(x) p(y) dx dy \\
&+ \sum_{i=1}^C M_i N (M_i N - 1) \left[\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{\beta} d_i^{-\beta}(x, y, L) p(x) p(y) dx dy \right]^2 \\
&+ \sum_{i=1}^C \sum_{j=1, j \neq i}^C 2M_i M_j N^2 \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r_1^{\beta} r_2^{\beta} d_{i,1}^{-\beta}(x_1, y_1, L) d_{j,2}^{-\beta}(x_2, y_2, L) \\
&\times p(x_1) p(x_2) p(y_1) p(y_2) dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 \quad (3.13)
\end{aligned}$$

A variância da interferência pode ser obtida por:

$$\frac{\sigma_I^2}{P^2} = \frac{\overline{I^2}}{P^2} - \left(\frac{\overline{I}}{P}\right)^2 \quad (3.14)$$

Substituindo o valor quadrático médio da interferência e o valor médio normalizado na equação (3.14), temos:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_I^2}{NP^2} &= \sum_{i=1}^C M_i \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{2\beta} d_i^{-2\beta}(x, y, L) p(x) p(y) dx dy \\ &\quad - \sum_{i=1}^C M_i \left[\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{\beta} d_i^{-\beta}(x, y, L) p(x) p(y) dx dy \right]^2 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Substituindo as FDP de x e y na equação (3.15) temos:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_I^2}{NP^2} &= \sum_{i=1}^C M_i \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{2\beta} d_i^{-2\beta}(x, y, L) dx dy \\ &\quad - \sum_{i=1}^C M_i \left[\frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{\beta} d_i^{-\beta}(x, y, L) dx dy \right]^2 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Infelizmente, nem o valor médio da interferência, nem a variância possuem forma fechada, e desta forma iremos obter seu valor numérico.

As Tab. 3.2 e Tab. 3.3 ilustram a interferência média normalizada e o desvio padrão normalizado em função do número de camadas, para expoentes de perda de propagação $\beta = 2$, e $\beta = 3$. Podemos notar que existe uma convergência do valor médio da interferência e do desvio padrão dessa interferência com o aumento do número de camadas, e que o valor do desvio padrão converge muito mais rápido do que o valor médio da interferência. Além disso, podemos notar que para $\beta = 2$, a convergência do valor médio da interferência para as 12 camadas consideradas não se dá de forma tão rápida como para o caso de $\beta = 3$. Isto ocorre devido a perda de percurso sofrida pelo sinal com $\beta = 2$ ser menor, fazendo com que um maior nível de interferência chegue à célula central.

i	$\frac{\bar{I}}{NP}$	$\frac{\sigma_I}{\sqrt{NP}}$
1	0,8162	0,4361
2	1,2022	0,4830
3	1,3785	0,4879
4	1,6586	0,4939
5	1,7445	0,4949
6	1,8205	0,4956
7	1,9570	0,4967
8	2,0615	0,4974
9	2,1038	0,4976
10	2,1833	0,4980
11	2,2208	0,4981
12	2,2883	0,4984

Tabela 3.2: Interferência média e desvio padrão normalizados em função do número de camadas de células, para $\beta = 2$.

i	$\frac{\bar{I}}{NP}$	$\frac{\sigma_I}{\sqrt{NP}}$
1	0,5041	0,4034
2	0,6654	0,4318
3	0,7103	0,4325
4	0,7737	0,4334
5	0,7886	0,4334
6	0,8010	0,4335
7	0,8220	0,4336
8	0,8360	0,4336
9	0,8411	0,4336
10	0,8504	0,4336
11	0,8546	0,4336
12	0,8618	0,4336

Tabela 3.3: Interferência média e desvio padrão normalizados em função do número de camadas de células, para $\beta = 3$.

Fatores como paredes e pisos causam significativa atenuação no sinal, fazendo com que o valor da interferência seja menor do que os apresentados nas tabelas anteriores. A influência de todos esses fatores será discutida nas seções a seguir.

3.2 Atenuação de Parede

A atenuação de parede é um parâmetro muito importante no cálculo da interferência para ambientes fechados, pois ao ser considerado, proporciona um aumento significativo na capacidade do sistema. Quando a ERM está se comunicando com uma determinada ERB (que não a ERB central) a potência desse sinal transmitido, chega na ERB central como interfe-

rência, mas por estar em outra sala, este sinal sofre uma atenuação proporcional ao número de paredes que ele passa até atingí-la.

Desta forma, a atenuação de parede é modelada como uma constante que depende do tipo de material empregado na construção dessas paredes. Várias medições já foram feitas com o intuito de se descobrir quanta atenuação uma parede pode causar em um sinal, e verificou-se que esse fator varia muito, com valores que vão de $w_{dB} = 1,5$ dB no caso de hangares que não apresentam estruturas internas, até $w_{dB} = 12$ dB no caso de escritórios construídos com tijolos e concreto reforçado com aço [1, 2, 3].

Iremos chamar a atenuação de parede de w , onde $w = 10^{\frac{w_{dB}}{10}}$, e w_{dB} representa a atenuação de parede dada em dB. Como não tem sentido considerarmos paredes no cálculo da interferência interna de uma célula, visto que não existem paredes dentro de uma célula, as equações apresentadas até o momento para este tipo de interferência continuam sendo válidas.

Como sabemos, por ser uma constante, a atenuação de parede apresenta valor médio e valor quadrático médio iguais a w e w^2 respectivamente.

3.2.1 Interferência Externa de uma Célula

Nesta sub-seção obteremos a interferência média normalizada devido às ERM's que operam em células adjacentes à célula central, onde o fator de atenuação de parede é levado em conta.

Neste caso, usando a equação (3.11), a interferência média normalizada pode ser escrita como:

$$\frac{\bar{I}}{NP} = \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{\gamma_i}} \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_i^{-\beta}(x, y, L) dx dy \quad (3.17)$$

onde γ_i é o número de paredes existentes entre a ERM na célula adjacente e a ERB da célula central, cujos valores variam de acordo com a camada em que está localizada essa ERM. Esses valores podem ser vistos na Tab. 3.4.

i	γ_i
1	1
2	2
3	2
4	3
5	4
6	3
7	4
8	5
9	4
10	5
11	6
12	6

Tabela 3.4: Número de paredes existente entre a ERM em uma célula adjacente e a ERB na célula central, em função da camada em que se encontra a ERM.

Usando (3.16), podemos escrever a variância normalizada como:

$$\begin{aligned}
\frac{\sigma_I^2}{NP^2} &= \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{2\gamma_i}} \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{2\beta} d_i^{-2\beta}(x, y, L) dx dy \\
&\quad - \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{2\gamma_i}} \left[\frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{\beta} d_i^{-\beta}(x, y, L) dx dy \right]^2
\end{aligned} \tag{3.18}$$

As Tab. 3.5 e Tab. 3.6 nos mostram a interferência média e o desvio padrão normalizados em função do número de camadas de células, para $\beta = 2$ e $\beta = 3$, respectivamente, considerando, para ambos os casos uma atenuação de parede $w_{dB} = 4$ dB. Como podemos verificar, a influência deste parâmetro é muito grande fazendo com que a contribuição no valor da interferência total para células que estejam localizadas em camadas superiores a três, ou seja $C > 3$, seja desprezível. Porém, examinando o arranjo de células mostrado na Fig. 3.3, percebemos que um arranjo de células considerando três camadas, não tem uma forma muito comum para um prédio comercial.

Desta forma, acreditamos que ao utilizarmos um arranjo quadrado de nove salas (Fig. 3.4), ou seja, considerando apenas duas camadas de células, nós estaríamos dentro dos padrões dos prédios comerciais existentes e além disso, de acordo com as Tab.3.5 e 3.6, já estamos considerando uma parcela suficiente da interferência. As distâncias d_1 , d_2 e d_3 representam

i	$\frac{\bar{I}}{NP}$	$\frac{\sigma_I}{\sqrt{NP}}$
1	0,3249	0,1736
2	0,3861	0,1767
3	0,4140	0,1771
4	0,4317	0,1771
5	0,4339	0,1771
6	0,4387	0,1771
7	0,4421	0,1771
8	0,4431	0,1771
9	0,4442	0,1771
10	0,4450	0,1771
11	0,4451	0,1771
12	0,4454	0,1771

Tabela 3.5: Interferência média e desvio padrão normalizados em função do número de camadas de células, para $\beta = 2$ e $w_{dB} = 4$ dB.

as distâncias entre o móvel e a ERB com a qual ele está mantendo contato.

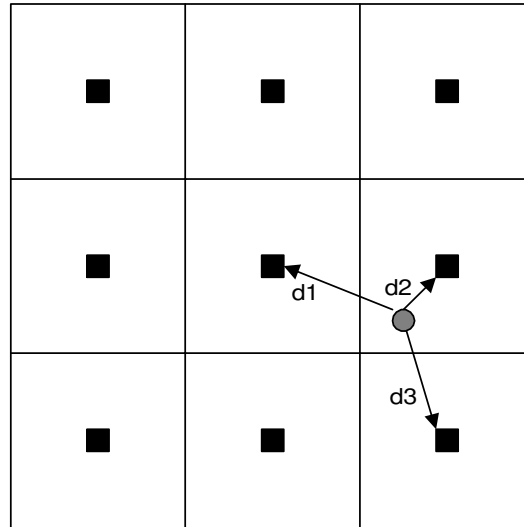


Figura 3.4: Arranjo de nove células quadradas com uma ERB por sala.

Para facilitar nossos cálculos nas próximas seções, iremos obter o valor de algumas inte-

i	$\frac{\bar{I}}{NP}$	$\frac{\sigma_I}{\sqrt{NP}}$
1	0,2007	0,1606
2	0,2262	0,1624
3	0,2334	0,1625
4	0,2374	0,1625
5	0,2377	0,1625
6	0,2385	0,1625
7	0,2390	0,1625
8	0,2392	0,1625
9	0,2393	0,1625
10	0,2394	0,1625
11	0,2394	0,1625
12	0,2394	0,1625

Tabela 3.6: Interferência média e desvio padrão normalizados em função do número de camadas de células, para $\beta = 3$ e $w_{dB} = 4$ dB.

grais, cujos valores serão apresentados em forma de tabelas. As integrais são:

$$\Omega_1 = \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{\gamma_i}} \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_i^{-\beta}(x, y, L) dx dy \quad (3.19)$$

$$\Omega_2 = \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{2\gamma_i}} \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{2\beta} d_i^{-2\beta}(x, y, L) dx dy \quad (3.20)$$

$$\Omega_3 = \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{2\gamma_i}} \left[\frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_i^{-\beta}(x, y, L) dx dy \right]^2 \quad (3.21)$$

Os resultados para a integral Ω_1 já foram mostrados nas Tabelas 3.5 e 3.6. Os resultados para as outras integrais podem ser vistos nas Tab. 3.7 e Tab. 3.8, para valores de $\beta = 2$ e $\beta = 3$, respectivamente. Lembrando que em ambos os casos é considerada a atenuação de parede de $w_{dB} = 4$ dB.

3.3 Controle Não-Ideal de Potência e Sombreamento

3.3.1 Interferência Interna de uma Célula

Existem muitos parâmetros que podem causar um imperfeito controle de potência em uma célula, e dentre eles, o sombreamento é um dos principais parâmetros a serem considerados. Na literatura, o controle não-ideal de potência é modelado como uma log-normal de média

i	Ω_2	Ω_3
1	0,05654	0,02639
2	0,05856	0,02733
3	0,05887	0,02752
4	0,05893	0,02756
5	0,05894	0,02756
6	0,05894	0,02757
7	0,05895	0,02757
8	0,05895	0,02757
9	0,05895	0,02757
10	0,05895	0,02757
11	0,05895	0,02757
12	0,05895	0,02757

Tabela 3.7: Integrais Ω_2 e Ω_3 para $\beta = 2$ e $w_{dB} = 4$ dB.

i	Ω_2	Ω_3
1	0,03585	0,01007
2	0,03661	0,01023
3	0,03664	0,01024
4	0,03665	0,01024
5	0,03665	0,01024
6	0,03665	0,01025
7	0,03665	0,01025
8	0,03665	0,01025
9	0,03665	0,01025
10	0,03665	0,01025
11	0,03665	0,01025
12	0,03665	0,01025

Tabela 3.8: Integrais Ω_2 e Ω_3 para $\beta = 3$ e $w_{dB} = 4$ dB.

0 dB, e desvio padrão entre 1 e 2 dB [9].

A potência que chega na ERB, devido a um usuário pertencente à mesma célula da ERB, dado que o controle de potência não é ideal, é igual a:

$$P r^\beta r^{-\beta} \nu = P \nu \quad (3.22)$$

onde a potência transmitida é igual a $P(r) = P r^\beta$, $r^{-\beta}$ é a perda de percurso, e ν é uma variável aleatória (VA) log-normal.

Considerando apenas os usuários que estão sendo controlados pela ERB da célula em que se está calculando a interferência interna, teremos que a interferência nessa ERB devido a esses usuários será dada por:

$$\frac{I}{P} = \nu_1 + \nu_2 + \cdots + \nu_{N-1} \quad (3.23)$$

onde $N - 1$ é o número de usuários interferentes, e ν_i é uma VA log-normal, $i = 1, \dots, N - 1$.

Assim, podemos escrever a interferência média como:

$$\frac{\bar{I}}{P} = \int_0^\infty \cdots \int_0^\infty (\nu_1 + \nu_2 + \cdots + \nu_{N-1}) p(\nu_1, \dots, \nu_{N-1}) d\nu_1 \cdots d\nu_{N-1} \quad (3.24)$$

onde $p(\nu_1, \dots, \nu_{N-1})$ é a FDP conjunta dos $N - 1$ usuários.

Como os $N - 1$ usuários possuem distribuições independentes, podemos escrever que:

$$\frac{\bar{I}}{P} = \int_0^\infty \cdots \int_0^\infty (\nu_1 + \nu_2 + \cdots + \nu_{N-1}) p(\nu_1) \cdots p(\nu_{N-1}) d\nu_1 \cdots d\nu_{N-1} \quad (3.25)$$

Além disso, como essas distribuições são idênticas temos:

$$\frac{\bar{I}}{(N - 1)P} = \int_0^\infty \nu p(\nu) d\nu \quad (3.26)$$

Da mesma forma, podemos escrever o valor quadrático médio como:

$$\frac{\bar{I}^2}{P^2} = \int_0^\infty \cdots \int_0^\infty (\nu_1 + \nu_2 + \cdots + \nu_{N-1})^2 p(\nu_1) \cdots p(\nu_{N-1}) d\nu_1 \cdots d\nu_{N-1}$$

Distribuindo-se o quadrado da equação anterior, e lembrando que as variáveis são independentes e idênticas, temos que:

$$\frac{\bar{I}^2}{P^2} = (N - 1) \int_0^\infty \nu^2 p(\nu) d\nu + (N - 1)(N - 2) \left[\int_0^\infty \nu p(\nu) d\nu \right]^2 \quad (3.27)$$

Substituindo (3.26) na equação anterior:

$$\frac{\bar{I}^2}{P^2} = (N-1) \int_0^\infty \nu^2 p(\nu) d\nu + \frac{(N-2)}{(N-1)} \left(\frac{\bar{I}}{P}\right)^2 \quad (3.28)$$

O desvio padrão da interferência pode ser obtido por:

$$\frac{\sigma_I}{P} = \sqrt{\frac{\bar{I}^2}{P^2} - \left(\frac{\bar{I}}{P}\right)^2} \quad (3.29)$$

Substituindo (3.26) e (3.28) na expressão anterior, podemos obter:

$$\frac{\sigma_I}{\sqrt{N-1}P} = \sqrt{\int_0^\infty \nu^2 p(\nu) d\nu - \left[\int_0^\infty \nu p(\nu) d\nu\right]^2} \quad (3.30)$$

A log-normal apresenta forma fechada tanto para seu valor médio quanto para seu valor quadrático médio, conforme já foi visto no capítulo 2, e são dados por:

$$\int_0^\infty \nu p(\nu) d\nu = \exp\left(m_{\log} + \frac{\sigma_{\log}^2}{2}\right) = \Omega_4 \quad (3.31)$$

$$\int_0^\infty \nu^2 p(\nu) d\nu = \exp(2m_{\log} + 2\sigma_{\log}^2) = \Omega_5 \quad (3.32)$$

Dessa forma, o desvio padrão é dado por:

$$\frac{\sigma_I}{\sqrt{N-1}P} = \sqrt{\int_0^\infty \nu^2 p(\nu) d\nu - \left[\int_0^\infty \nu p(\nu) d\nu\right]^2} = \sqrt{\exp(2m_{\log} + 2\sigma_{\log}^2)[\exp(\sigma_{\log}^2) - 1]}$$

onde m_{\log} e σ_{\log} são a média e o desvio padrão logarítmicos respectivamente.

Para expressar a média e o desvio padrão em dB, devemos utilizar a seguinte transformação:

$$\begin{aligned} m_{\log} &= \frac{\ln(10)}{10} m_{dB} \\ \sigma_{\log} &= \frac{\ln(10)}{10} \sigma_{dB} \end{aligned} \quad (3.33)$$

Assim, as expressões para o valor médio e para o desvio padrão da interferência, em função do desvio padrão em dB da log-normal, seriam:

$$\frac{\bar{I}}{(N-1)P} = \exp\left[\frac{\ln^2(10)}{100} \sigma_{dB}^2\right] \quad (3.34)$$

$$\frac{\sigma_I}{\sqrt{N-1}P} = \sqrt{\exp\left[\frac{\ln^2(10)}{50} \sigma_{dB}^2\right] - \exp\left[\frac{\ln^2(10)}{100} \sigma_{dB}^2\right]} \quad (3.35)$$

$\sigma_{\nu_{dB}}$	$\frac{\bar{I}}{(N-1)P}$	$\frac{\sigma_I}{\sqrt{N-1}P}$
0,0	1,000	0,0000
0,5	1,007	0,1163
1,0	1,027	0,2396
1,5	1,061	0,3788
2,0	1,112	0,5404

Tabela 3.9: Valor médio e desvio padrão em função do desvio padrão da log-normal em dB.

$\sigma_{\nu_{dB}}$	Ω_4	Ω_5	$\sqrt{\Omega_5 - \Omega_4^2}$
0	1,000	1,000	0,000
1	1,027	1,112	0,239
2	1,112	1,528	0,540
3	1,269	2,597	0,993
4	1,528	5,455	1,766
5	1,940	14,17	3,226
6	2,597	45,48	6,224
7	3,666	180,5	12,93
8	5,455	885,7	29,26
9	8,561	5.373	72,80
10	14,17	40.288	200,2

Tabela 3.10: Integrais Ω_4 e Ω_5 em função do desvio padrão da log-normal em dB.

A Tab.3.9 mostra o valor médio e o desvio padrão da interferência interna de uma célula em função do desvio padrão da log-normal. Esses resultados também foram obtidos através de simulação utilizando-se o método de Monte Carlo. Podemos notar que quando a log-normal tem desvio padrão de 0 dB, ou seja, controle de potência ideal, a interferência média normalizada pela potência P é determinística com valor igual ao número de usuários interferentes $\frac{I}{(N-1)P} = 1$.

Para melhor entendermos como variam os valores numéricos da média e do valor quadrático médio da log-normal, representados por Ω_4 e Ω_5 , a Tab. 3.10 nos mostra alguns de seus valores em função do desvio padrão em dB da log-normal. Podemos notar que a variação dos valores obtidos para o valor quadrático médio, representados por Ω_5 , é bem mais rápida do que a variação dos valores obtidos para o valor médio, representado por Ω_4 .

3.3.2 Interferência Externa de uma Célula

Agora, queremos calcular a interferência normalizada devido a usuários que operam em outras células, que não a célula central. Também estamos considerando que nessas outras

células é feito o controle de potência sobre as ERM. A análise será feita para dois casos: controle de potência realizado por uma ERB (mais próxima), controle de potência realizado por E ERBs (ou seja, controle de potência realizado por uma dentre as E ERBs mais próximas) Veremos que os valores obtidos no primeiro caso (controle realizado por uma ERB) serão muito altos se comparado aos outros casos (mais de uma ERB). Além disso, a norma IS-95 já especifica que a ERM deve se comunicar não com a ERB mais próxima e sim com a ERB cujo sinal que chega na ERM, seja o de maior potência.

CONTROLE DE POTÊNCIA REALIZADO POR UMA ERB

Quando, uma certa ERM é controlada pela ERB mais próxima, a potência que chega nesta ERM no canal direto é dada por:

$$P_{R,M} = P_{T,B} r_d^{-\beta} \nu_d \quad (3.36)$$

onde $P_{R,M}$ é a potência que chega até a ERM que dista r da ERB e $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $P_{T,B}$ é a potência transmitida pela ERB, ν_d é o sombreamento no canal direto, β é o expoente da perda de propagação. Baseado em dados experimentais, o sombreamento é modelado como uma VA log-normal com média de 0 dB e desvio padrão de $\sigma_{\nu_{dB}}$ dB [10]. O controle de potência tenta compensar não somente a perda de percurso, como também o sombreamento. Deste modo, a ERM, no sentido de compensar a perda de percurso e sombreamento do enlace direto, transmite com potência igual a:

$$\frac{P r^\beta}{\nu_d} \quad (3.37)$$

onde P é a potência que deve chegar na ERB em questão. A potência que chega na ERB da célula central, devido a um usuário localizado numa célula adjacente na $i^{ésima}$ camada, é igual a:

$$\frac{P r^\beta}{\nu_d} d_i^{-\beta}(x, y, L) \nu_r \frac{1}{w^{\gamma_i}} \quad (3.38)$$

onde a potência transmitida é igual a $P(r) = \frac{P r^\beta}{\nu_d}$, ν_r é o sombreamento do canal reverso modelado da mesma maneira que no canal direto, $d_i(x, y, L)$ é a distância entre a ERM e a

ERB central, e w^{γ_i} é a atenuação de parede sofrida pelo sinal.

O quociente entre essas duas VAs log-normais, que será representado por ν , é também uma VA log-normal com média em decibéis nula e desvio padrão em decibéis $\sqrt{2}$ vezes maior que o desvio padrão das VAs log-normais individuais.

A interferência na ERB central é dada por:

$$\frac{I}{P} = r_1^\beta d_1^{-\beta}(x, y, L) \nu_1 \frac{1}{w^{\gamma_1}} + \cdots + r_J^\beta d_J^{-\beta}(x, y, L) \nu_J \frac{1}{w^{\gamma_J}} \quad (3.39)$$

onde $J = N \sum_{i=1}^C M_i$ é o número de usuários considerados nas C camadas, e ν_i é a composição entre as log-normais.

Deste modo, a interferência média normalizada proveniente dos usuários que não estão se comunicando com a ERB central é dada por:

$$\frac{\bar{I}}{NP} = \int_0^\infty \nu p(\nu) d\nu \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{\gamma_i}} \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_i^{-\beta}(x, y, L) dx dy \quad (3.40)$$

Podemos notar que a equação (3.40) pode ser escrita em função de (3.19) e (3.31). A Tab. 3.11 mostra o valor médio da interferência em função do desvio padrão da log-normal e do expoente de perda de propagação, para o modelo apresentado na Fig. 3.4, onde consideramos apenas duas camadas. Podemos notar que o valor da interferência é alto pois o controle de potência é realizado por apenas uma ERB. Além disso, pode-se perceber que quanto menor β maior a interferência causada na célula central

Da mesma maneira podemos escrever a variância normalizada da interferência como:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_I^2}{NP^2} &= \int_0^\infty \nu^2 p(\nu) d\nu \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{2\gamma_i}} \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{2\beta} d_i^{-2\beta}(x, y, L) dx dy - \\ &\quad \left(\int_0^\infty \nu p(\nu) d\nu \right)^2 \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{2\gamma_i}} \left(\frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_i^{-\beta}(x, y, L) dx dy \right)^2 \end{aligned} \quad (3.41)$$

A Tab. 3.12 mostra o desvio padrão da interferência em função do desvio padrão da log-normal e do expoente de perda de propagação, para duas camadas de células. Podemos

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 dB$
$\beta = 2$	1,4533	2,6040	5,1876	11,491	28,301
$\beta = 3$	0,8515	1,5258	3,0396	6,7330	16,583

Tabela 3.11: Valor médio da interferência normalizada para duas camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, e do expoente de perda de propagação, para $w_{dB} = 4$ dB e controle de potência realizado por uma ERB.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 dB$
$\beta = 2$	3,3713	10,950	43,627	214,28	1300,0
$\beta = 3$	2,6840	8,6763	34,515	169,45	1028,0

Tabela 3.12: Desvio padrão da interferência normalizada para duas camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, e do expoente de perda de propagação, para $w_{dB} = 4$ dB e controle de potência realizado por uma ERB.

notar que o desvio padrão da interferência atinge valores altíssimos para alos valores de desvio padrão do sombreamento devido ao controle de potência ser realizado por apenas uma ERB.

CONTROLE DE POTÊNCIA REALIZADO POR E ERBS

Generalizando, quando uma certa ERM é controlada por E ERBs, a potência que chega nesta ERM no canal direto é dada por:

$$P_{R,M} = \max\{P_{T,B_I} r_I^{-\beta} \nu_{d,I}, P_{T,B_{II}} r_{II}^{-\beta} \nu_{d,II}, \dots, P_{T,B_E} r_E^{-\beta} \nu_{d,E}\} \quad (3.42)$$

onde r_i é a distância entre a ERB_i e a ERM, P_{T,B_i} é a potência transmitida pela ERB_i , $\nu_{d,i}$ é o sombreamento no canal direto entre a ERB_i e a ERM.

O controle de potência tenta compensar não somente a perda de percurso, como também o sombreamento, ou seja, a ERM transmite com potência igual a :

$$\min\left\{\frac{Pr_I^\beta}{\nu_{d,I}}, \frac{Pr_{II}^\beta}{\nu_{d,II}}, \dots, \frac{Pr_E^\beta}{\nu_{d,E}}\right\} \quad (3.43)$$

A potência que chega na ERB da célula central, devido a um usuário localizado numa célula adjacente na $i^{ésima}$ camada, é igual a:

$$\min\left\{\frac{Pr_I^\beta}{\nu_{d,I}}, \frac{Pr_{II}^\beta}{\nu_{d,II}}, \dots, \frac{Pr_E^\beta}{\nu_{d,E}}\right\} d_i^{-\beta}(x, y, L) \nu_r \frac{1}{w^{\gamma_i}} \quad (3.44)$$

Através das simulações, pudemos notar que, devido à presença de paredes entre as células, apesar de termos E ERBs em contato com o móvel, verificamos que o móvel praticamente só

se comunica com as ERBs que estão mais próximas. Podemos verificar isto através das Fig. 3.5 e 3.6, que nos mostram a FDP de x quando o controle de potência é realizado por uma ERB e por três ERBs, respectivamente, onde a atenuação de parede é $w_{dB} = 4$ dB, $\sigma_{\nu_{dB}} = 6$ dB, $\beta = 2, 5$, e $L = 10$ m.

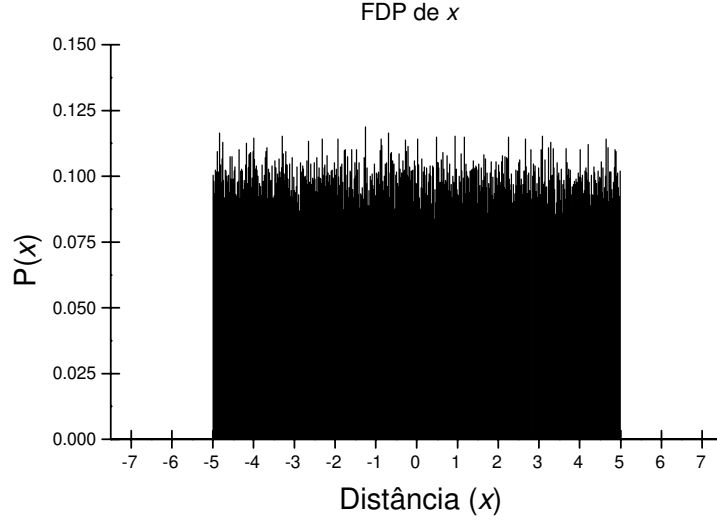


Figura 3.5: FDP de x para controle de potência realizado por uma ERB, com $w_{dB} = 4$ dB, $\sigma_{\nu_{dB}} = 6$ dB, $\beta = 2, 5$, e $L = 10$ m.

Como podemos perceber através da Fig. 3.6, poucos móveis se comunicam com ERBs localizadas a uma distância acima de $\frac{L}{2}$. O mesmo ocorre se considerarmos a FDP de y . Assim, considerando que a distância $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ e o sombreamento log-normal ν são VA independentes, podemos aproximar o $\min\{\frac{Pr_I^\beta}{\nu_{d,I}}, \frac{Pr_{II}^\beta}{\nu_{d,II}}, \dots, \frac{Pr_E^\beta}{\nu_{d,E}}\}$ separando-o em dois mínimos, ou seja, o $\min\{\frac{P}{\nu_{d,I}}, \frac{P}{\nu_{d,II}}, \dots, \frac{P}{\nu_{d,E}}\}$ e o $\min\{r_I^\beta, r_{II}^\beta, \dots, r_E^\beta\}$. Entretanto, conforme já mostramos na Fig. 3.6, podemos considerar que o $\min\{r_I^\beta, r_{II}^\beta, \dots, r_E^\beta\}$ é dado por r^β , onde r continua sendo dado por $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ com $-\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}$, $-\frac{L}{2} \leq y \leq \frac{L}{2}$.

Também através das simulações, pudemos notar que o mínimo entre E VAs log-normais também é uma VA log-normal. Assim, podemos considerar que o $\min\{\frac{P}{\nu_{d,I}}, \frac{P}{\nu_{d,II}}, \dots, \frac{P}{\nu_{d,E}}\}$ é

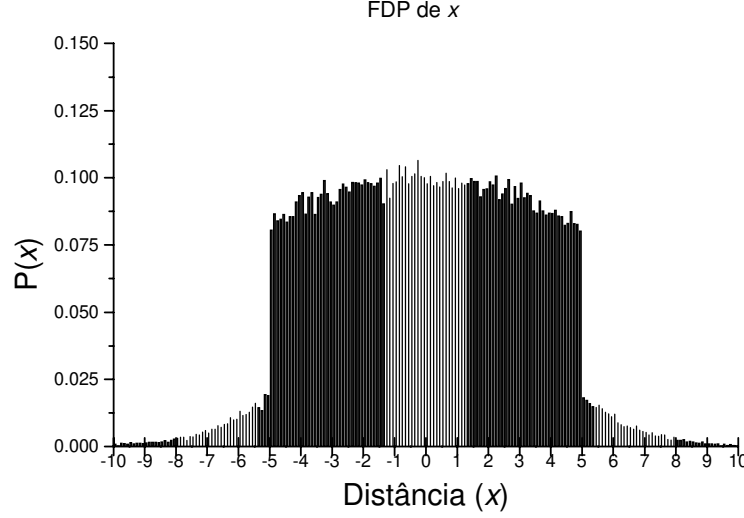


Figura 3.6: FDP de x para controle de potência realizado por três ERBs, com $w_{dB} = 4$ dB, $\sigma_{\nu_{dB}} = 6$ dB, $\beta = 2, 5$, e $L = 10$ m.

dado por:

$$\frac{P}{\nu_{dequ}} \quad (3.45)$$

onde ν_{dequ} é o sombreamento equivalente do canal direto.

Assim, podemos simplificar a equação (3.44) para:

$$\frac{P r^\beta}{\nu_{dequ}} d_i^{-\beta}(x, y, L) \nu_r \frac{1}{w^{\gamma_i}} \quad (3.46)$$

No caso do controle de potência realizado por uma ERB, as VAs log-normais do quociente representado por $\frac{\nu_r}{\nu_d}$ são exatas, e por isso consideramos que este quociente pode ser representado por uma outra VA log-normal denominada de ν , com desvio padrão em decibéis $\sqrt{2}$ vezes maior que o desvio padrão das VAs log-normais individuais. Porém, como o sombreamento no canal direto é um sombreamento equivalente, ele apresenta um desvio padrão diferente do desvio padrão do sombreamento no canal reverso. Dessa forma, teremos que considerar uma outra abordagem.

Assim, representaremos o quociente entre essas duas VAs log-normais por ν_{equ} , que também é uma VA log-normal com média nula e desvio padrão dado por um $\sigma_{\nu_{dBequ}}$ que iremos

obter através do método de ajuste de parâmetros, também conhecido pelo termo em inglês ("fitting").

MÉTODO DE AJUSTE DE PARÂMETROS (FITTING) O método de ajuste de parâmetros consiste em obter, através de simulação, alguns pontos do tipo (x, y) se estivermos utilizando um modelo de duas dimensões, ou pontos do tipo (x, y, z) se esse modelo for de três dimensões e assim por diante, e a partir desses pontos obter a curva que passa por esses pontos e posteriormente a expressão matemática dessa curva. Por exemplo, considerando o caso mais simples, ou seja, um modelo de duas dimensões, suponhamos que o conjunto de pontos obtidos sejam: $(1, 1)$, $(2, 4)$, $(3, 9)$ e $(4, 16)$. Ao traçarmos a curva que passa por esses pontos notaremos que eles representam uma parábola que pode ser dada pela função $f(x) = x^2$.

Entretanto, podemos representar uma função $f(x)$ em torno de um ponto nominal a por uma série de potências denominada de *série de Taylor*, desde que o intervalo de convergência $a - r^* < x < a + r^*$ ($r^* > 0$) seja respeitado, onde r^* é o raio de convergência de uma série de potências tal que a série converge absolutamente quando $|x - a| < r^*$ e diverge quando $|x - a| > r^*$ (ver Apêndice A). Assim, a série de Taylor da função $f(x)$, considerando-se a representação até a derivada de primeira ordem, é dada por:

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x - a) + \dots \quad (3.47)$$

Portanto, se tivermos o gráfico da função $f(x)$ em torno do ponto a , podemos representá-la pela soma dada em (3.47), onde o primeiro termo é dado pelo valor da função no ponto a . Para o segundo termo, temos que obter $f'(x)$ em torno do ponto a , e de posse desses valores obter uma equação que consiga representar todos os pontos obtidos na vizinhança de a .

Inicialmente, pensou-se que o desvio padrão equivalente do sombreamento $\sigma_{\nu_{dB_{equ}}}$ fosse depender de três parâmetros: o sombreamento log-normal ($\sigma_{\nu_{dB}}$), o número de ERBs em contato com a ERM, ou seja, o número de ERBs que participam do controle de potência (E), e o expoente da perda de propagação (β). Entretanto, através das simulações notamos que a influência de β era muito pequena e portanto não consideramos β na obtenção de

$\sigma_{\nu_{dB_{equ}}}$.

Assim, se considerarmos que $\sigma_{\nu_{dB_{equ}}}$ é uma função de duas variáveis, ou seja, de $\sigma_{\nu_{dB}}$ e E , podemos seguir o mesmo raciocínio apresentado para a função $f(x)$ e escrever essa função de duas variáveis através de uma série de Taylor (o desenvolvimento da série de Taylor para uma função de duas variáveis pode ser visto no Apêndice A).

Denominamos de $\sigma_{\nu_{dB_{equ}}}(\sigma_{\nu_{dB}}, E)$ a função que descreve o comportamento do desvio padrão equivalente do sombreamento log-normal dado em dB, e denominamos de a e b os valores nominais para $\sigma_{\nu_{dB}}$ e E , onde $a = \sigma_{\nu_{dB}} = 6$ dB e $b = E = 3$.

Assim, para escrevermos essa função através de série de Taylor, obteremos o valor da função no ponto dado por (a, b) , ou seja, $\sigma_{\nu_{dB_{equ}}}(a, b)$ para o primeiro termo da soma, e as derivadas parciais de primeira ordem calculadas no ponto p_0 , para o segundo termo, ou seja,

$$\frac{\partial F}{\partial p}(p - p_0) \quad (3.48)$$

onde F representa a função $\sigma_{\nu_{dB_{equ}}}$, p representa um dos dois parâmetros, e p_0 representa o valor nominal do parâmetro p que está sendo considerado.

Desta forma, a função $\sigma_{\nu_{dB_{equ}}}(\sigma_{\nu_{dB}}, E)$ pode ser representada por:

$$\sigma_{\nu_{dB_{equ}}}(\sigma_{\nu_{dB}}, E) = \sigma_{\nu_{dB_{equ}}}(a, b) + \left[\frac{\partial \sigma_{\nu_{dB_{equ}}}}{\partial \sigma_{\nu_{dB}}}(\sigma_{\nu_{dB}} - a) + \frac{\partial \sigma_{\nu_{dB_{equ}}}}{\partial E}(E - b) \right] \quad (3.49)$$

As equações obtidas através do método de ajuste de parâmetros, que representam cada termo da equação (3.49) são dadas por:

$$\sigma_{\nu_{dB_{equ}}}(a, b) = 5,2683; \quad (3.50)$$

$$\frac{\partial \sigma_{\nu_{dB_{equ}}}}{\partial \sigma_{\nu_{dB}}}(\sigma_{\nu_{dB}} - a) = -3,7770 + 0,6389\sigma_{\nu_{dB}}; \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial \sigma_{\nu_{dB_{equ}}}}{\partial E}(E - b) = -0,2312 + 27,2781 e^{-\frac{E}{0,6294}}; \quad (3.52)$$

O valor dado em (3.50), foi obtido através de simulação ao se considerar $\sigma_{\nu_{dB}} = 6$ dB e $E = 3$. Na obtenção da equação (3.51), nós mantivemos E fixo e igual a 3, e variamos o parâmetro $\sigma_{\nu_{dB}}$ dentro do intervalo $5 \text{ dB} \leq \sigma_{\nu_{dB}} \leq 8 \text{ dB}$, obtendo através de simulação

4 pontos para a função $\sigma_{\nu_{dB_{equ}}}(\sigma_{\nu_{dB}}, E)$. Assim, traçamos a curva que passava por esses 4 pontos e obtivemos uma expressão matemática que melhor se ajustou a essa curva, expressão essa obtida pela soma das equações (3.50) e (3.51). Essas curvas podem ser vistas na Fig. 3.7.

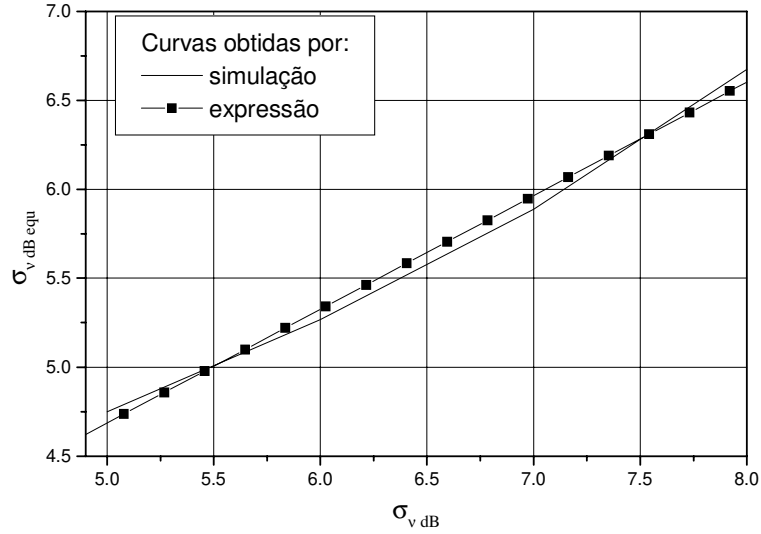


Figura 3.7: Desvio padrão do sombreamento equivalente em dB, em função do desvio padrão do sombreamento em dB, para $E = 3$

Entretanto, como fixamos um dos parâmetros (E) e variamos apenas o outro ($\sigma_{\nu_{dB}}$), nós voltamos ao caso de $f(x)$ pois temos apenas uma variável em questão. Assim, a expressão obtida contém, além da derivada parcial de primeira ordem, o valor da função no ponto (a, b) , ou seja: $\sigma_{\nu_{dB_{equ}}}(a, b)$.

Logo, para conseguirmos a expressão correta da derivada parcial de primeira ordem, precisamos subtrair o valor da função no ponto (a, b) , ou seja o valor dado em (3.50) e assim podemos escrever a função dada por (3.51).

Na obtenção da equação (3.52), nós mantivemos $\sigma_{\nu_{dB}}$ fixo e igual a 6 dB, e variamos o parâmetro E dentro do intervalo $1 \leq E \leq 9$, obtendo através de simulação 5 pontos para a função $\sigma_{\nu_{dB_{equ}}}(\sigma_{\nu_{dB}}, E)$. Assim como no caso anterior, traçamos a curva que passava por esses 5 pontos e obtivemos uma outra expressão matemática que melhor se ajustou a essa

curva, expressão essa obtida pela soma das equações (3.50) e (3.52). Essas curvas podem ser vistas na Fig. 3.8.

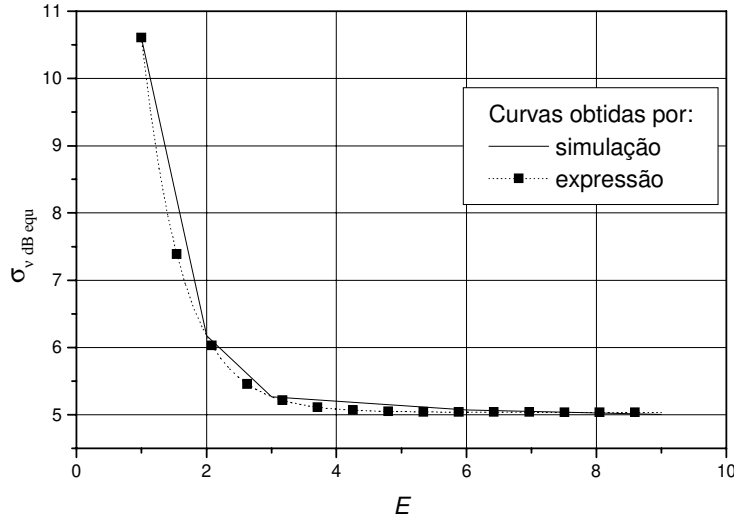


Figura 3.8: Desvio padrão do sombreamento equivalente em dB, em função do número E de ERBs que participam do controle de potência.

Assim como no caso da obtenção de (3.51), a expressão obtida, considerando o parâmetro E como variável, também contém, além da derivada parcial de primeira ordem, o valor da função no ponto (a, b) , ou seja, o valor dado em (3.50).

Portanto, para conseguirmos a expressão correta da derivada parcial de primeira ordem, também precisamos subtrair o valor dado em (3.50) e assim podemos escrever a função dada por (3.52).

Através da Fig. 3.9, pode-se verificar a precisão atingida através deste ajuste de parâmetros na obtenção de $\sigma_{\nu_{dB_{equ}}}$. Nesta figura, foram comparados os valores de $\sigma_{\nu_{dB_{equ}}}$ obtidos por simulação e pela equação (3.49), para valores de $\sigma_{\nu_{dB}}$ e E dentro dos intervalos já mencionados, utilizados para a obtenção das equações. Podemos notar que os valores obtidos pela equação é confiável, principalmente no caso em que o controle de potência é realizado por três ERBs. Além disso, podemos verificar que quanto maior o número de ERBs responsáveis pelo controle de potência, menor é o desvio padrão do sombreamento equivalente e

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$\beta = 2$	0,6912	0,8189	0,9915	1,2267	1,5509
$\beta = 3$	0,4050	0,4798	0,5809	0,7188	0,9087

Tabela 3.13: Valor médio da interferência normalizada para duas camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, e do expoente de perda de propagação, para $w_{dB} = 4 \text{ dB}$ e controle de potência realizado por três ERBs.

consequentemente menor é a interferência externa que irá atingir a célula central.

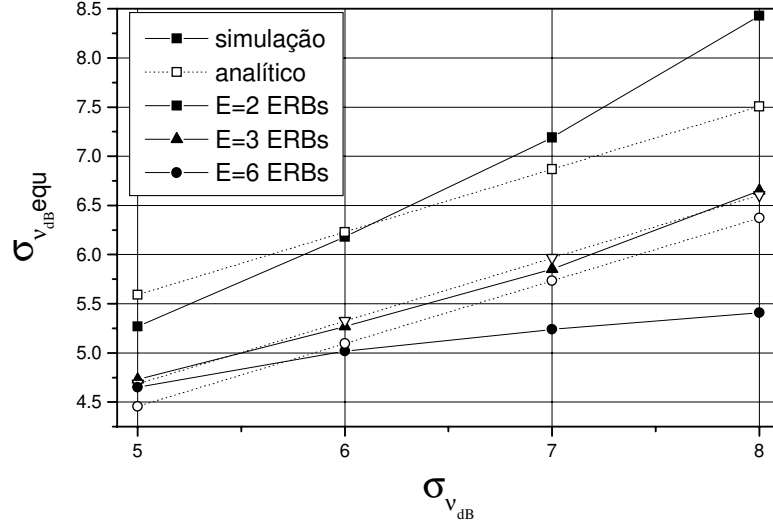


Figura 3.9: Desvio padrão do sombreamento equivalente em dB, em função do desvio padrão do sombreamento em dB, parametrizado em função do número E de ERBs que participam do controle de potência.

Assim, a interferência média normalizada aproximada é dada por:

$$\frac{\bar{I}}{NP} \simeq \int_0^\infty \nu_{equ} P(\nu_{equ}) d\nu_{equ} \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{\gamma_i}} \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_i^{-\beta}(x, y, L) dx dy \quad (3.53)$$

A Tab. 3.13 nos mostra o valor médio da interferência em função do desvio padrão da log-normal e do expoente de perda de propagação, para duas camadas de células, para $w_{dB} = 4 \text{ dB}$ e controle de potência realizado por três ERBs, obtida pela equação (3.53). Podemos notar a grande diminuição do valor médio da interferência se compararmos aos dados obtidos na Tab. 3.11, visto que agora o controle de potência é realizado por três ERBs.

De forma análoga, podemos escrever a variância normalizada da interferência aproximada

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$\beta = 2$	0,7168	1,0306	1,5382	2,3854	3,8473
$\beta = 3$	0,5858	0,8336	1,2347	1,9045	3,0603

Tabela 3.14: Desvio padrão da interferência normalizada para duas camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, e do expoente de perda de propagação, para $w_{dB} = 4 \text{ dB}$ e controle de potência realizado por três ERBs.

como:

$$\frac{\sigma_I^2}{NP^2} \simeq \int_0^\infty \nu_{equ}^2 p(\nu_{equ}) d\nu_{equ} \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{2\gamma_i}} \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{2\beta} d_i^{-2\beta}(x, y, L) dx dy -$$

$$\left(\int_0^\infty \nu_{equ} p(\nu_{equ}) d\nu_{equ} \right)^2 \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{2\gamma_i}} \left(\frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_i^{-\beta}(x, y, L) dx dy \right)^2 \quad (3.54)$$

A Tab. 3.14 nos mostra o desvio padrão da interferência em função do desvio padrão da log-normal e do expoente de perda de propagação, para duas camadas de células, para $w_{dB} = 4 \text{ dB}$ e controle de potência realizado por três ERBs, obtido pela equação (3.54). Também podemos notar a grande diminuição do valor obtido para o desvio padrão se compararmos aos valores obtidos na Tab. 3.12, pois agora o controle de potência é realizado por três ERBs, que como vimos diminui o efeito do sombreamento.

3.4 Fator de Atividade de Voz (FAV)

3.4.1 Interferência Interna de uma Célula

Outro parâmetro muito importante no aumento da capacidade de sistemas CDMA é o fator de atividade de voz. Os usuários falam em média aproximadamente entre 30-60% do tempo, e durante o tempo em que o usuário está em silêncio, o mesmo gera menos interferência para o sistema, e dessa forma, a capacidade do sistema CDMA em questão é aumentada. A atividade de voz de um usuário é modelada por uma distribuição de Bernoulli, com valores 0 e 1, onde o 0 está associado ao estado de silêncio, enquanto que o 1 está associado ao estado de fala. A probabilidade de silêncio é dada por $1 - \alpha$, enquanto que a probabilidade de fala

é dada por α [10], ou seja:

$$\begin{aligned}\eta &= 0 \Rightarrow p = 1 - \alpha \\ \eta &= 1 \Rightarrow p = \alpha\end{aligned}$$

A distribuição de Bernoulli tem valor médio e valor quadrático médio iguais a α .

A potência que chega na ERB, devido a um usuário pertencente à mesma célula da ERB, dado que o controle de potência não é ideal, é igual a:

$$P r^\beta r^{-\beta} \nu \eta = P \nu \eta \quad (3.55)$$

onde η representa a atividade de voz.

A interferência na ERB central devido a usuários da mesma célula é dada por:

$$\frac{I}{P} = \nu_1 \eta_1 + \nu_2 \eta_2 + \cdots + \nu_{N-1} \eta_{N-1} \quad (3.56)$$

Assim, a interferência média pode ser escrita como:

$$\frac{\bar{I}}{(N-1)P} = \int_0^\infty \nu p(\nu) d\nu \sum_{j=0}^1 \eta_j p(\eta_j) \quad (3.57)$$

pois o erro no controle de potência e a atividade de voz são variáveis independentes, e os $N-1$ usuários possuem distribuições idênticas, tanto do erro do controle de potência, quanto da atividade de voz.

Dessa forma, usando o valor médio de uma variável com distribuição de Bernoulli, podemos escrever o valor médio da interferência como:

$$\frac{\bar{I}}{(N-1)P} = \alpha \int_0^\infty \nu p(\nu) d\nu \quad (3.58)$$

De maneira análoga, podemos escrever que o valor quadrático médio da interferência é:

$$\frac{\overline{I^2}}{P} = (N-1) \int_0^\infty \nu^2 p(\nu) d\nu \sum_{j=0}^1 \eta_j^2 p(\eta_j) + (N-1)(N-2) \left[\int_0^\infty \nu p(\nu) d\nu \sum_{j=0}^1 \eta_j p(\eta_j) \right]^2 \quad (3.59)$$

O desvio padrão da interferência pode ser obtido então por,

$$\frac{\sigma_I}{\sqrt{N-1}P} = \sqrt{\alpha \int_0^\infty \nu^2 p(\nu) d\nu - \alpha^2 \left[\int_0^\infty \nu p(\nu) d\nu \right]^2} \quad (3.60)$$

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 0 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 1 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 2 \text{ dB}$
$\alpha = 0,3$	0,3000	0,3081	0,3336
$\alpha = 0,4$	0,4000	0,4107	0,4447
$\alpha = 0,5$	0,5000	0,5134	0,5559
$\alpha = 0,6$	0,6000	0,6161	0,6671
$\alpha = 0,7$	0,7000	0,7188	0,7783

Tabela 3.15: Valor médio da interferência normalizada em função do erro do controle de potência em dB, e do fator de atividade de voz.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 0 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 1 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 2 \text{ dB}$
$\alpha = 0,3$	0,4583	0,4885	0,5893
$\alpha = 0,4$	0,4899	0,5254	0,6431
$\alpha = 0,5$	0,5000	0,5407	0,6746
$\alpha = 0,6$	0,4899	0,5362	0,6870
$\alpha = 0,7$	0,4583	0,5115	0,6812

Tabela 3.16: Desvio padrão da interferência normalizada em função do erro do controle de potência em dB, e do fator de atividade de voz.

Através de simulação, usando-se o método de Monte Carlo, analisou-se e constatou-se que a interferência devido aos usuários pertencentes à mesma célula em análise, pode ser aproximada por uma distribuição Gaussiana, desde que o número de usuários seja grande o suficiente (vide Teorema Central do Limite). Utilizando as equações propostas acima pudemos verificar que seus resultados estão de acordo com a simulação realizada. As Tab. 3.15 e Tab. 3.16 mostram o valor médio normalizado e o desvio padrão normalizado da interferência interna de uma célula, em função do desvio padrão em dB da log-normal, e do fator de atividade de voz.

Quando a log-normal tem desvio padrão de 0 dB, temos o caso em que o controle de potência é ideal. Assim, o valor médio da interferência passa a valer $\frac{\bar{I}}{(N-1)P} = \alpha$ e o desvio padrão é dado por $\frac{\sigma_I}{\sqrt{N-1}P} = \sqrt{\alpha(1-\alpha)}$.

3.4.2 Interferência Externa de uma Célula

Novamente, iremos calcular a interferência e o desvio padrão normalizado médio devido a usuários que operam em células adjacentes à célula central, onde agora, o fator de atividade de voz, o sombreamento e a atenuação de parede são levados em conta. Trabalhando com os dois casos já estudados anteriormente, onde a ERM é controlada por uma ou E ERBs,

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$\beta = 2$	0,2765	0,3276	0,3966	0,4907	0,6203
$\beta = 3$	0,1620	0,1919	0,2324	0,2875	0,3635

Tabela 3.17: Valor médio da interferência normalizada para duas camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0, 4$, para $w_{dB} = 4 \text{ dB}$ e controle de potência realizado por três ERBs.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$\beta = 2$	0,3456	0,4095	0,4957	0,6133	0,7754
$\beta = 3$	0,2025	0,2399	0,2905	0,3594	0,4544

Tabela 3.18: Valor médio da interferência normalizada para duas camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0, 5$, para $w_{dB} = 4 \text{ dB}$ e controle de potência realizado por três ERBs.

teremos as equações (3.53) e (3.54) um pouco modificada devido ao fator de atividade de voz, visto que os outros parâmetros já foram levados em conta.

Neste caso, pode-se mostrar que a interferência média normalizada pode ser escrita por:

$$\frac{\bar{I}}{NP} \simeq \alpha \int_0^\infty \nu_{equ} p(\nu_{equ}) d\nu_{equ} \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{\gamma_i}} \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_i^{-\beta}(x, y, L) dx dy \quad (3.61)$$

para o caso em que o controle de potência é realizado por E ERBs.

As Tab. 3.17, 3.18, 3.19 mostram a interferência média normalizada em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, para $w_{dB} = 4 \text{ dB}$ e controle de potência realizado por três ERBs, para $\alpha = 0, 4$, $\alpha = 0, 5$ e $\alpha = 0, 6$ respectivamente. Podemos notar que quanto maior o tempo de fala de um usuário durante uma conversa, representado aqui pelo aumento de α , maior a interferência média. Entretanto, podemos notar que ao considerarmos a monitoração da atividade de voz, o nível de interferência diminui ainda mais comparado com os níveis de interferência apresentados na Tab. 3.13.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$\beta = 2$	0,4147	0,4913	0,5949	0,7360	0,9305
$\beta = 3$	0,2430	0,2879	0,3486	0,4313	0,5452

Tabela 3.19: Valor médio da interferência normalizada para duas camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0, 6$, para $w_{dB} = 4 \text{ dB}$ e controle de potência realizado por três ERBs.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$\beta = 2$	0,4760	0,6740	0,9948	1,5305	2,4549
$\beta = 3$	0,3810	0,5376	0,7912	1,2147	1,9457

Tabela 3.20: Desvio padrão da interferência para duas camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, para $w_{dB} = 4 \text{ dB}$ e controle de potência realizado por três ERBs.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$\beta = 2$	0,5280	0,7495	1,1082	1,7071	2,7406
$\beta = 3$	0,4240	0,5991	0,8827	1,3562	2,1735

Tabela 3.21: Desvio padrão da interferência para duas camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0,5$, para $w_{dB} = 4 \text{ dB}$ e controle de potência realizado por três ERBs.

De forma análoga, podemos escrever a variância normalizada como:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_I^2}{NP^2} &\simeq \alpha \int_0^\infty \nu_{equ}^2 p(\nu_{equ}) d\nu_{equ} \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{2\gamma_i}} \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{2\beta} d_i^{-2\beta}(x, y, L) dx dy - \\ &\left(\alpha \int_0^\infty \nu_{equ} p(\nu_{equ}) d\nu_{equ} \right)^2 \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{2\gamma_i}} \left(\frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{\beta} d_i^{-\beta}(x, y, L) dx dy \right)^2 \end{aligned} \quad (3.62)$$

para o caso em que o controle de potência é realizado por E ERBs.

As Tab. 3.20, 3.21, 3.22 mostram o desvio padrão da interferência em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, para $w_{dB} = 4 \text{ dB}$ e controle de potência realizado por três ERBs, para $\alpha = 0,4$, $\alpha = 0,5$ e $\alpha = 0,6$ respectivamente. Assim como no caso da interferência média quanto maior α maior desvio padrão da interferência. Também podemos notar que ao considerarmos a monitoração da atividade de voz, o valor obtido para o desvio padrão da interferência diminui mais um pouco se comparado com os valores obtidos para o desvio padrão apresentados na Tab. 3.14.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$\beta = 2$	0,5738	0,8165	1,2095	1,8656	2,9978
$\beta = 3$	0,4624	0,6542	0,9649	1,4836	2,3788

Tabela 3.22: Desvio padrão da interferência para duas camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0,6$, para $w_{dB} = 4 \text{ dB}$ e controle de potência realizado por três ERBs.

3.5 Simulação

Agora, será realizada uma comparação entre os resultados obtidos com as equações propostas e os resultados obtidos através de simulação. Utilizamos para isso um simulador na forma de um programa em linguagem C++ que nos desse a interferência média normalizada, à qual está submetida uma dada ERB no link reverso (no nosso caso a ERB central), bem como o desvio padrão normalizado dessa interferência. Os móveis foram aleatoriamente distribuídos nas 9 salas, já mostradas na Fig. 3.4. Os valores a serem utilizados para os parâmetros: atenuação de parede e de perda de percurso, atividade de voz e desvio padrão do sombreamento log-normal, serão baseados nos valores experimentais obtidos de [1, 2, 3].

O expoente da perda de propagação é um dos parâmetros que apresenta uma grande variação em ambientes internos, com valores que vão desde $\beta = 1,8$, como no caso de termos a propagação ao longo de um corredor, até $\beta = 6,7$ no caso de termos a propagação em um ambiente com muitas obstruções e grande presença de superfícies metálicas [2].

Como já mencionamos anteriormente, a atenuação de parede é um parâmetro que influi bastante na capacidade do sistema, e seu valor é muito dependente do tipo de material utilizado na construção da parede, variando de $1,5 \leq w_{dB} \leq 12$ [1, 2, 3].

O fator de atividade de voz também é outro parâmetro fundamental na capacidade do sistema, pois em virtude dos usuários móveis falarem apenas 30-60% do tempo, esse tempo em que eles permanecem em silêncio, resulta em uma menor interferência.

Vale ressaltar, que todos os valores dos parâmetros por nós utilizados, são válidos quando os móveis se comunicam em uma frequência de 900 MHz. Em frequências maiores, esses valores se tornam diferentes, principalmente a atenuação de parede. Já o fator de atividade de voz não é influenciado por essa mudança.

Desta forma, escolhemos como parâmetros de simulação : $L = 10$ m, $\beta = 2,5$, $w_{dB} = 4$ dB, $\alpha = 0,4$ e o desvio padrão do sombreamento log-normal variando de 2 dB a 7 dB.

As Fig. 3.10 e 3.11 mostram a interferência média normalizada e o desvio padrão normali-

zado em função do desvio padrão do sombreamento em dB, respectivamente. Podemos notar que as equações propostas para o caso em que o móvel está sendo controlado por apenas uma ERB se mostram precisas em virtude de não utilizarmos nenhuma aproximação nas equações obtidas para este caso de controle de potência realizado por uma ERB, tornando as equações exatas.

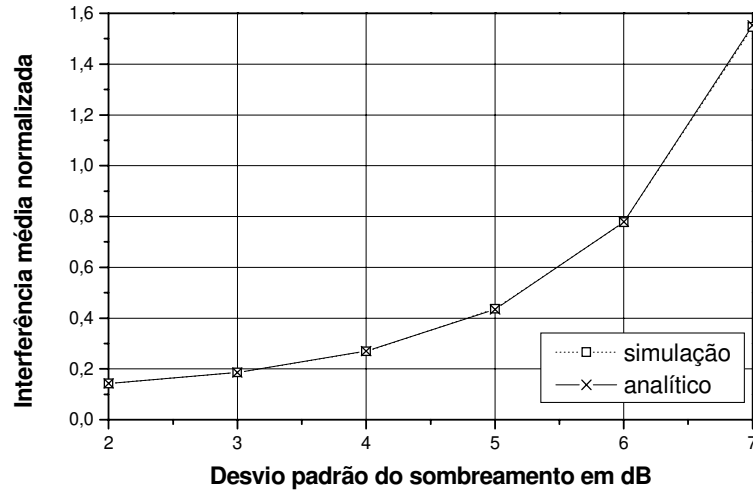


Figura 3.10: Interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento, com $\beta = 2, 5$, $\alpha = 0, 4$, $w_{dB} = 4$ dB, para controle de potência realizado por uma ERB.

A Fig. 3.12 mostra a interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento para os casos em que o móvel está sendo controlado por duas e por três ERBs. Podemos notar que, apesar dos resultados obtidos pelas equações não serem tão exatos como no caso do controle de potência realizado por uma ERB, as equações se mostraram confiáveis, o que mostra que as aproximações utilizadas são precisas para ambos os casos.

A Fig. 3.13 mostra o desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento para os casos em que o móvel está sendo controlado por duas e por três ERBs. Novamente, as equações se mostraram confiáveis, principalmente no caso do controle de potência realizado por três ERBs. Além disso, verifica-se que algumas discrepâncias entre o valor obtido por simulação e o valor obtido pelas equações ocorrem para valores



Figura 3.11: Desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento, com $\beta = 2,5$, $\alpha = 0,4$, $w_{dB} = 4$ dB, para controle de potência realizado por uma ERB.

mais altos do desvio padrão do sombreamento.

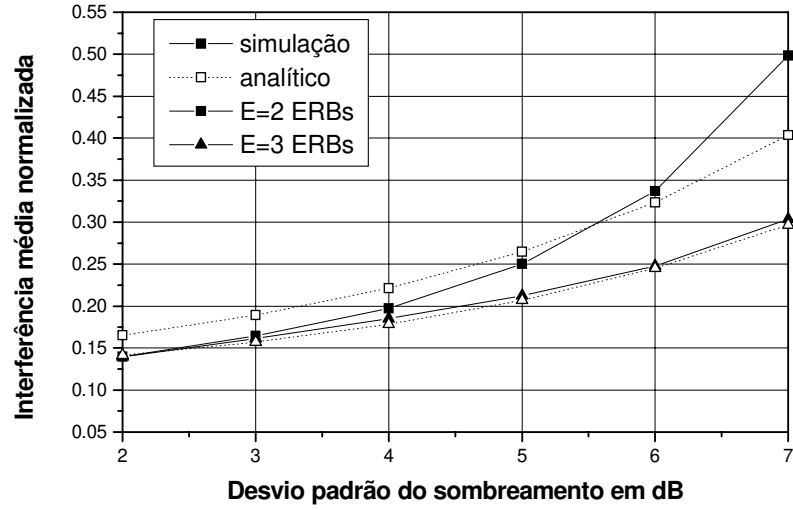


Figura 3.12: Interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento, com $\beta = 2, 5$, $\alpha = 0, 4$, $w_{dB} = 4$ dB, para controle de potência realizado por duas e três ERBs.

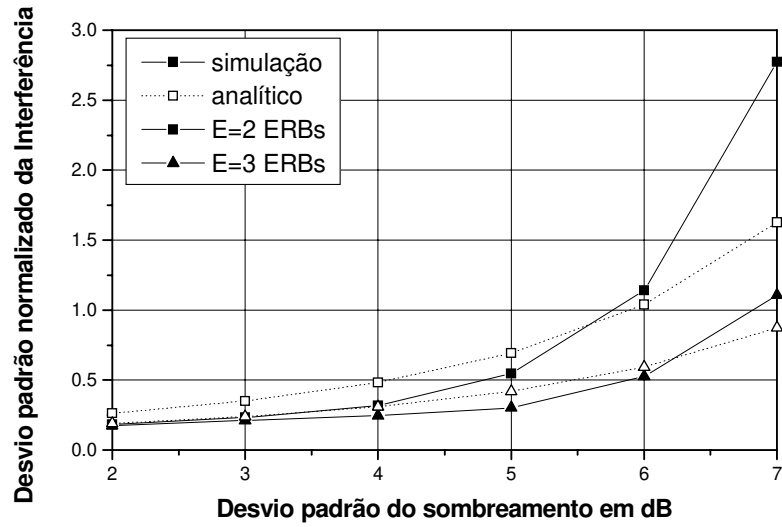


Figura 3.13: Desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento, com $\beta = 2, 5$, $\alpha = 0, 4$, $w_{dB} = 4$ dB, para controle de potência realizado por duas e três ERBs.

Capítulo 4

Cálculo Analítico da Interferência em Prédios

Neste capítulo apresentamos o cálculo analítico da interferência para a obtenção do seu valor médio e desvio padrão da mesma forma já obtida no capítulo anterior. Entretanto, utilizaremos um modelo tridimensional para descrever a localização dos móveis e das ERBs. Serão analisados o controle de potência realizado por uma ERB (a mais próxima), e controle de potência realizado pela ERB mais forte, ou seja, pela ERB que apresente menor atenuação em relação a ERM considerada.

Após a obtenção desses valores analíticos, faremos uma comparação com os valores obtidos por simulação para verificar a precisão das equações obtidas. Além dos parâmetros considerados no capítulo anterior na modelagem do sistema bidimensional, iremos considerar a atenuação de piso.

4.1 Controle Ideal de Potência

4.1.1 Interferência Interna de uma Célula

Consideraremos um modelo mais realista, ou seja, um modelo tridimensional onde as ERMs e as ERBs encontram-se em alturas diferentes. Continuaremos utilizando coordenadas cartesianas para descrever a posição da ERM dentro da célula, só que desta vez, além dos eixos x e y , teremos o eixo z que irá determinar a altura do móvel, e também da ERB, em relação ao piso. Iremos considerar que o móvel está sempre a uma altura fixa em relação ao piso da

sala em que ele se encontra, assim como consideraremos que as ERBs colocadas em cada sala também apresentam posição fixa, em relação ao piso. Portanto, teremos apenas as funções densidade de probabilidade para a abscissa e para a ordenada, já apresentadas no capítulo 3 pelas equações (3.1) e (3.2), respectivamente. Além disso, não estaremos considerando o sombreamento nessa análise preliminar do cálculo da interferência interna.

Comparando o modelo que utiliza um arranjo com 69 salas, com o que utiliza um arranjo quadrado de nove salas (Fig. 3.4) apresentado no capítulo anterior, nós pudemos notar, através das Tab.3.5 e 3.6 que este modelo já contém quase 90% da interferência que irá atingir a célula central. Desta forma, o nosso modelo tridimensional basear-se-á no mesmo arranjo quadrado de nove salas, porém com três andares.

O modelo tridimensional com três andares mencionado anteriormente pode ser visto na Fig. 4.1.

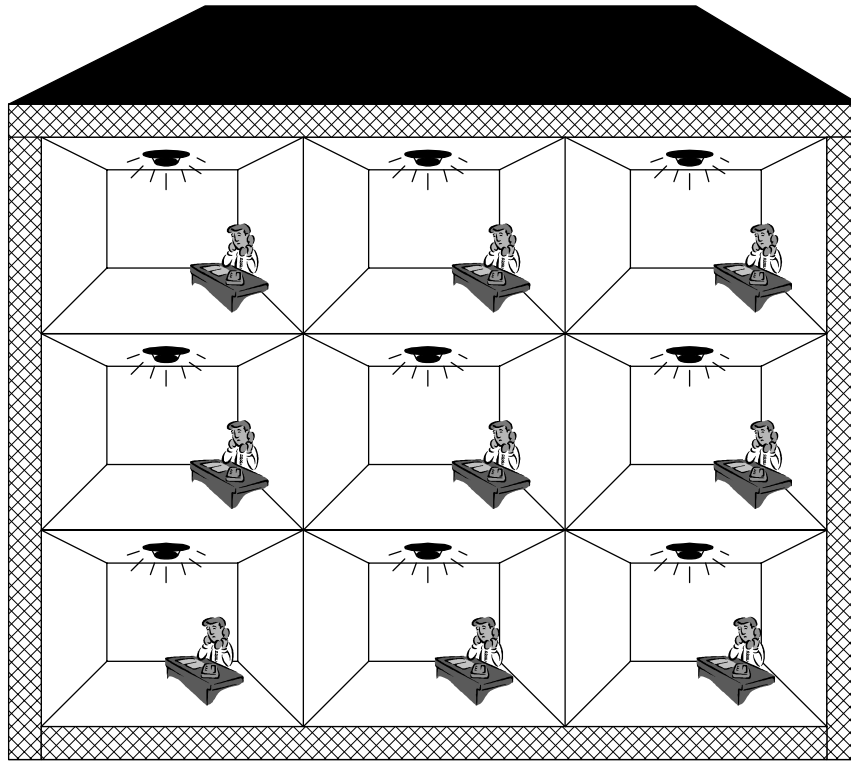


Figura 4.1: Prédio de três andares com nove salas quadradas por andar.

As salas continuarão a serem representadas por quadrados de lado L , mas agora com

altura h , e espessura dos pisos dada por s . Isto é mostrado na Fig. 4.2. A distância z representa a distância vertical entre os móveis e a ERB da mesma sala, e dz_m representa a distância vertical entre os móveis e o piso da mesma sala. Se considerássemos a vista de cima do prédio teríamos a imagem da Fig. 3.4.

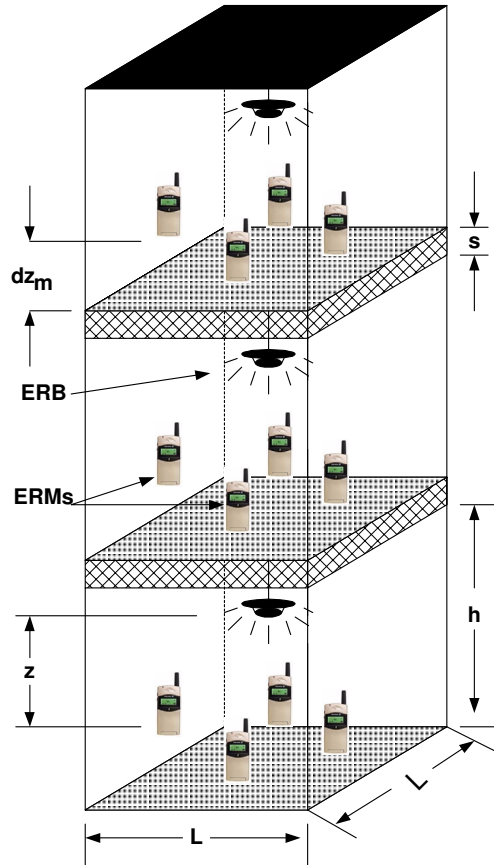


Figura 4.2: Modelo utilizado para o prédio de 3 andares com os móveis uniformemente distribuídos em cada sala.

Como nosso modelo possui três pisos, a célula que experimenta a maior interferência externa é a célula central do segundo piso. Desta forma, as expressões para o valor médio da interferência externa e para seu desvio padrão serão obtidas tomando-se como referência essa célula central. As ERBs, além de apresentarem altura fixa em relação ao piso da sala em que se encontram, continuaram situadas no centro da sala conforme já visto na Fig. 3.4.

Assim, a potência que chega na ERB, devido a uma ERM situada na mesma sala, é dada

por:

$$P = P_{T,M} r^{-\beta} \quad (4.1)$$

onde $P_{T,M}$ é a potência transmitida por uma ERM que se situa a uma distância r da ERB, onde $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, β é o expoente de perda de propagação.

Supondo que a ERB realiza controle de potência ideal sobre as ERMs, temos que cada usuário deve transmitir uma potência $P r^\beta$, onde P é a potência que deverá chegar na ERB.

Desta forma, a interferência total que chega em uma ERB devido aos $N - 1$ usuários interferentes que operam na própria célula é determinística e como no capítulo 3, vale $I = (N - 1)P$, que se escrevermos de outra forma, teremos a interferência normalizada por usuário por Watt,

$$\frac{I}{(N - 1)P} = 1 \quad (4.2)$$

4.1.2 Interferência Externa de uma Célula

Novamente, estamos interessados em calcular a interferência normalizada proveniente dos usuários de outras células, que não a central. Iremos analisar o controle de potência realizado por uma ERB, e pela ERB mais forte.

CONTROLE DE POTÊNCIA REALIZADO POR UMA ERB

Considere uma célula adjacente também quadrada de lado L e altura h que pode ou não estar situada no mesmo piso em questão. Considere N ERMs uniformemente distribuídas nesta célula adjacente. Considere também que a ERB desta célula adjacente, realiza controle de potência ideal sobre os usuários de sua célula. Assim, P é a potência que chega na ERB da célula adjacente, devido a um usuário de sua própria célula.

Desta forma, baseado nas mesmas deduções realizadas na seção (3.1.2), podemos chegar

à expressão da interferência média normalizada dada por:

$$\frac{\bar{I}}{NP} = \sum_{j=1}^F \sum_{i=0}^C M_{i,j} \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_{i,j}^{-\beta}(x, y, z, L, s, h) dx dy \quad (4.3)$$

onde $d_{i,j}(x, y, z, L, s, h)$ é a distância de um usuário da célula adjacente na $i^{ésima}$ camada e $j^{ésimo}$ piso até a ERB da célula central, C representa o número de camadas, F representa o número de pisos, e $M_{i,j}$ representa o número de células adjacentes na $i^{ésima}$ camada e $j^{ésimo}$ piso.

No capítulo anterior, o número dado a uma camada dependia da distância entre o centro da célula adjacente e o centro da célula central. Assim, para a primeira camada, eram consideradas as células com menor distância entre centros, para a segunda camada, as células com a segunda menor distância entre centros e assim por diante.

Seguindo o mesmo raciocínio, se os móveis estivessem no mesmo plano das ERBs, teríamos como primeira camada, as células centrais do primeiro e terceiro pisos, como segunda camada as células indicadas com 1 na Fig. 3.3 considerando o segundo piso, como terceira camada as mesmas células indicadas com 1 na Fig. 3.3, mas considerando agora o primeiro e o terceiro pisos, e assim por diante.

Entretanto, os móveis não se encontram no mesmo plano das ERBs, e portanto algumas considerações precisam ser feitas para que possamos utilizar as definições apresentadas na Fig. 3.3 em relação as camadas. Iremos denominar a célula hachurada da Fig. 3.3 (célula central) de camada zero, sendo que as camadas um e dois continuam as mesmas, e assim,teremos três camadas por piso, ou seja, um ponto a mais.

Assim, se compararmos a equação (3.11) com a equação (4.3) podemos notar que o somatório em relação ao número de camadas agora parte do zero. Além disso, temos outro somatório em relação ao número de pisos. Isto se deve ao fato da distância depender não só da camada em que se encontra o usuário, mas também do piso.

Por apresentarmos três camadas de células e três pisos, a distância $d_{i,j}(x, y, z, L, s, h)$ apresenta oito formas diferentes que podem ser vistas na Tab. 4.1, onde i representa a

i, j	$d_{i,j}(x, y, z, L, s, h)$	$M_{i,j}$
0,1	$\sqrt{x^2 + y^2 + (h + s + z)^2}$	1
0,3	$\sqrt{x^2 + y^2 + (h + s - z)^2}$	1
1,1	$\sqrt{x^2 + (L + y)^2 + (h + s + z)^2}$	4
1,2	$\sqrt{x^2 + (L + y)^2 + z^2}$	4
1,3	$\sqrt{x^2 + (L + y)^2 + (h + s - z)^2}$	4
2,1	$\sqrt{(L + x)^2 + (L + y)^2 + (h + s + z)^2}$	4
2,2	$\sqrt{(L + x)^2 + (L + y)^2 + z^2}$	4
2,3	$\sqrt{(L + x)^2 + (L + y)^2 + (h + s - z)^2}$	4

Tabela 4.1: Distância $d_{i,j}(x, y, z, L, s, h)$ entre a ERB central e uma das ERBs da i^{esima} camada no j^{esimo} piso e o número de células adjacentes que a compõem.

camada em que o usuário se encontra, e j o piso. Sendo que $M_{i,j} = 0$ para $i = 0$, e $j = 2$, pois a célula central do segundo piso é justamente a célula que sofre a interferência externa e portanto não pode ser levada em conta no cálculo.

Analogamente ao que foi feito no capítulo anterior, podemos chegar à expressão da variância normalizada dada por:

$$\begin{aligned}
\frac{\sigma_I^2}{NP^2} = & \sum_{j=1}^F \sum_{i=0}^C M_{i,j} \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{2\beta} d_{i,j}^{-2\beta}(x, y, z, L, s, h) dx dy \\
& - \sum_{j=1}^F \sum_{i=0}^C M_{i,j} \left[\frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{\beta} d_{i,j}^{-\beta}(x, y, z, L, s, h) dx dy \right]^2
\end{aligned} \quad (4.4)$$

Novamente, por não apresentarem forma fechada, iremos obter o valor numérico do valor médio da interferência e de sua variância.

As Tab. 4.2 e Tab. 4.3 ilustram a interferência média normalizada e o desvio padrão normalizado em função do número de camadas, para expoentes de perda de propagação $\beta = 2$ e $\beta = 3$, considerando os três pisos. Vale lembrar que estamos considerando a altura dos móveis e das ERBs fixas e neste caso, a altura do móvel é de 1 m do piso e da ERB é de 2,5 m do piso, a altura da sala é de 3 m, e a espessura dos pisos é de 0,3 m. Podemos notar que $\beta = 3$ já causa uma grande redução na interferência.

Como o desenvolvimento das equações considerando parâmetros como: a atenuação de parede, o sombreamento, e o fator de atividade de voz já foram feitos no capítulo anterior,

i	$\frac{\bar{I}}{NP}$	$\frac{\sigma_I}{\sqrt{NP}}$
0	0,5458	0,5122
1	1,5172	0,7494
2	2,0075	0,7983

Tabela 4.2: Interferência média e desvio padrão normalizados em função das três primeiras camadas de células, para $\beta = 2$, sem a presença de sombreamento.

i	$\frac{\bar{I}}{NP}$	$\frac{\sigma_I}{\sqrt{NP}}$
0	0,4786	0,4733
1	1,0461	0,6438
2	1,2463	0,6664

Tabela 4.3: Interferência média e desvio padrão normalizados em função das três primeiras camadas de células, para $\beta = 3$, sem a presença de sombreamento.

nós não iremos repetí-los. As equações a serem apresentadas são para o caso em que o móvel é controlado por uma ERB, ou seja, pela ERB mais próxima, visto que as aproximações feitas no capítulo anterior, na obtenção do desvio padrão do sombreamento equivalente, quando consideramos o caso do controle de potência realizado por E ERBs, não se mostraram tão precisas para este modelo tridimensional, e desta forma outras considerações serão feitas mais adiante.

Assim, a interferência média normalizada, considerando-se a atenuação de parede, sombreamento, e fator de atividade de voz, pode ser escrita como:

$$\frac{\bar{I}}{NP} = \alpha \int_0^\infty \nu p(\nu) d\nu \sum_{j=1}^F \sum_{i=0}^C \frac{M_{i,j}}{w^{\gamma_{i,j}}} \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_{i,j}^{-\beta}(x, y, z, L, s, h) dx dy \quad (4.5)$$

onde chamamos de ν o quociente entre os sombreamentos do canal direto e reverso, $\gamma_{i,j}$ é o número de paredes existentes entre a ERM na célula adjacente e a ERB na célula central, cujos valores variam de acordo com a camada(i) e piso(j) em que está localizada essa ERM. Esses valores podem ser vistos na Tab. 4.4.

i, j	$\gamma_{i,j}$
0,1	0
0,2	0
0,3	0
1,1	1
1,2	1
1,3	1
2,1	2
2,2	2
2,3	2

Tabela 4.4: Número de paredes existente entre a ERM na célula adjacente e a ERB na célula central de acordo com a camada e piso a qual se encontra a ERM.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$\beta = 2$	3,8025	6,8132	13,573	30,066	74,048
$\beta = 3$	2,7711	4,9653	9,8919	21,911	53,964

Tabela 4.5: Valor médio da interferência normalizada para as três primeiras camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0, 4$, para controle de potência realizado por uma ERB, e atenuação de parede $w_{dB} = 4 \text{ dB}$.

De forma análoga, podemos escrever a variância normalizada como:

$$\frac{\sigma_I^2}{NP^2} = \alpha \int_0^\infty \nu^2 p(\nu) d\nu \sum_{j=1}^F \sum_{i=0}^C \frac{M_{i,j}}{w^{2\gamma_{i,j}}} \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{2\beta} d_{i,j}^{-2\beta}(x, y, z, L, s, h) dx dy -$$

$$\left(\alpha \int_0^\infty \nu p(\nu) d\nu \right)^2 \sum_{j=1}^F \sum_{i=0}^C \frac{M_{i,j}}{w^{2\gamma_{i,j}}} \left(\frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_{i,j}^{-\beta}(x, y, z, L, s, h) dx dy \right)^2 \quad (4.6)$$

As Tab. 4.5 e 4.6 mostram a interferência média normalizada em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz, para controle de potência realizado por uma ERB, e atenuação de parede $w_{dB} = 4 \text{ dB}$. Podemos notar que, assim como observado no capítulo 3, a interferência média é muito alta quando o controle de potência é realizado por apenas uma ERB.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$\beta = 2$	4,7531	8,51649	16,967	37,582	92,560
$\beta = 3$	3,4639	6,2066	12,365	27,389	67,455

Tabela 4.6: Valor médio da interferência normalizada para as três primeiras camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0, 5$, para controle de potência realizado por uma ERB, e atenuação de parede $w_{dB} = 4 \text{ dB}$.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9\text{ dB}$
$\beta = 2$	9,8166	31,804	126,61	621,72	3771,8
$\beta = 3$	8,8640	28,716	114,32	561,35	3405,5

Tabela 4.7: Desvio padrão da interferência para as três primeiras camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, para controle de potência realizado por uma ERB, e atenuação de parede $w_{dB} = 4\text{ dB}$.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9\text{ dB}$
$\beta = 2$	10,939	35,521	141,52	695,07	4217,0
$\beta = 3$	9,8774	32,073	127,78	627,57	3807,5

Tabela 4.8: Desvio padrão da interferência para as três primeiras camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0,5$, para controle de potência realizado por uma ERB, e atenuação de parede $w_{dB} = 4\text{ dB}$.

As Tab. 4.7 e 4.8 mostram o desvio padrão da interferência em função dos mesmos parâmetros anteriores, para controle de potência realizado por uma ERB, e atenuação de parede $w_{dB} = 4\text{ dB}$. A mesma observação feita para a interferência média pode ser feita para o desvio padrão, onde notamos valores muito altos quando o controle de potência é realizado por uma ERB.

Nesses resultados que acabamos de obter, ainda não se levou em conta um parâmetro fundamental que é a atenuação causada pelo piso entre um andar e outro. A atenuação causada pelos pisos dos andares, faz com que a interferência que chega na célula central seja reduzida em muito, o que veremos a seguir.

4.2 Atenuação de Piso

A atenuação de piso é um fator indispensável no cálculo da interferência para ambientes fechados que apresentam mais de um andar, como é o caso do nosso modelo utilizado (Fig. 4.1), pois devido a atenuação que o piso oferece ao sinal que está sendo propagado, a interferência que chega a ERB central é diminuída proporcionando um aumento na capacidade do sistema. A influência deste parâmetro é semelhante a da atenuação de parede.

Assim, quando o móvel, que está se comunicando com uma determinada ERB, que não a ERB central, encontra-se ou no primeiro, ou no terceiro piso, além de uma atenuação devido a distância e às paredes que o sinal possa vir a sofrer, existe uma atenuação proporcional

ao número de pisos que este sinal enfrenta até atingir a ERB central, fazendo com que a potência do sinal transmitido por este móvel chegue na célula central mais fraco ainda.

Da mesma forma que a atenuação de parede, vamos modelar a atenuação de piso como uma constante, que depende do tipo de material e reforço empregado na construção do mesmo. Muitas medições já foram realizadas e verificou-se que esse fator também varia muito, não só com o tipo de material empregado mas também com a frequência.

Em um ambiente fechado como um prédio por exemplo, onde existem vários andares, o sinal transmitido pode chegar até seu destino por muitos caminhos, sendo que entre eles, teríamos o caminho direto do transmissor até o receptor passando através das paredes e pisos, e o caminho em que o sinal sai do prédio através de alguma janela, e difrata através da face do prédio, difratando novamente para dentro do prédio em algum piso inferior ou superior atingindo assim o receptor. Podemos visualizar esses dois caminhos através da Fig. 4.3.

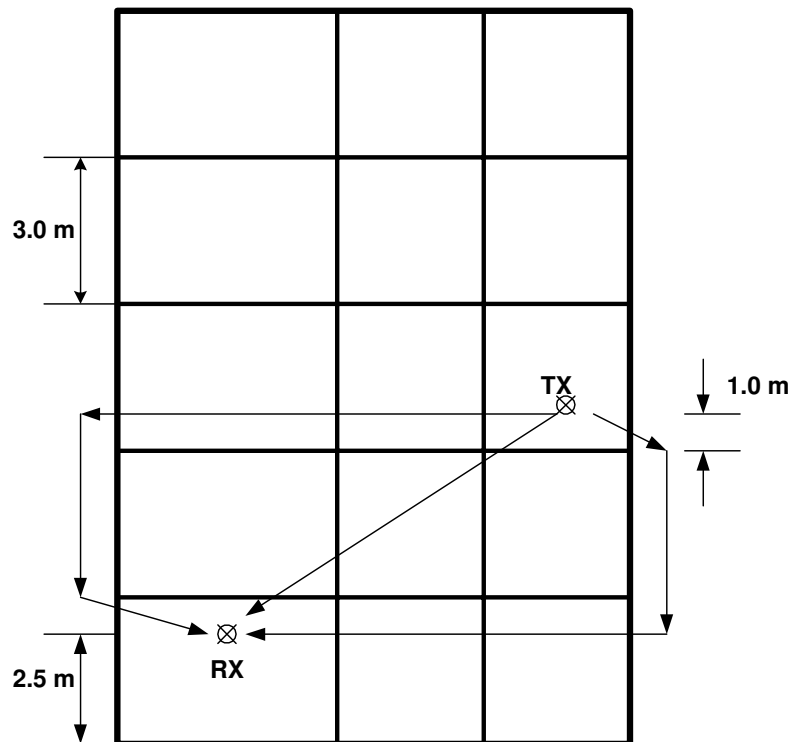


Figura 4.3: Corte vertical de um prédio de 5 andares, mostrando um caminho direto e dois caminhos envolvendo dupla difração entre uma ERM (TX) e uma ERB (RX), localizadas em pisos diferentes.

Através do gráfico da Fig.4.4 [11], podemos notar que a difração se torna um fator indispensável quando o sinal de uma ERM se comunicando com uma determinada ERB tem que atravessar mais do que 6 andares. Como no nosso caso temos apenas 3 andares envolvidos, a difração pode ser desprezada, e podemos considerar um crescimento linear da perda em dB para a atenuação de piso.

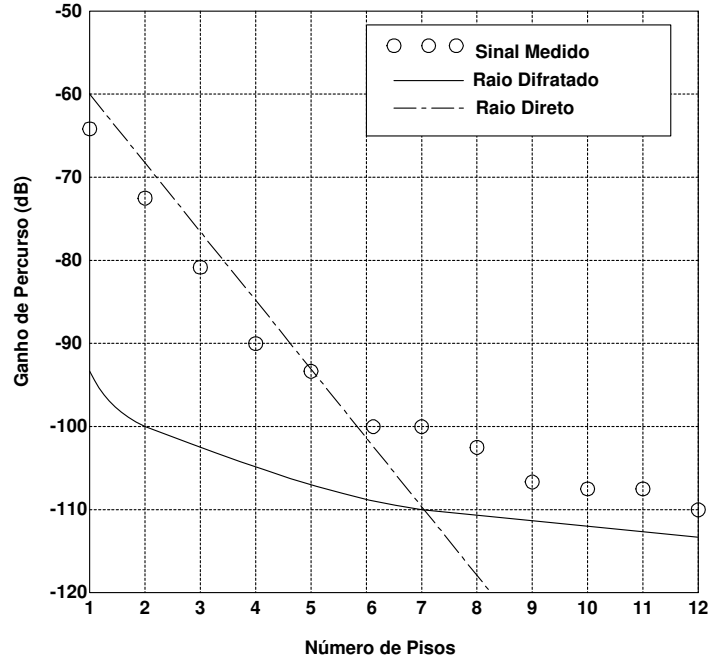


Figura 4.4: Comparação entre o valor médio do ganho de percurso (inverso aditivo da perda) medido e calculado numa pequena área entre uma ERM e um ponto do prédio em função do número de pisos existentes entre eles. Os ganhos de percurso do raio refratado e direto são mostrados separadamente.

Iremos chamar a de atenuação de piso de f onde $f = 10^{\frac{f_{dB}}{10}}$, e f_{dB} representa a atenuação de piso em dB. Novamente não tem sentido falarmos de pisos no cálculo da interferência interna de uma célula, visto que não existem pisos a serem considerados no cálculo, e dessa forma, as equações apresentadas até o momento para este tipo de cálculo continuam sendo válidas.

j	λ_j
1	1
2	0
3	1

Tabela 4.9: Número de pisos existente entre a ERM na célula adjacente e a ERB na célula central de acordo com o andar a qual se encontra a ERM.

4.2.1 Interferência Externa de uma Célula

Assim como nos casos anteriores, iremos calcular agora a interferência média normalizada devido as ERM's que operam em células adjacentes à célula central, levando em conta a atenuação de piso que é o último fator a ser considerado em (4.5) e (4.6). Vale lembrar que estas equações ainda são para o caso do controle de potência realizado por uma ERB.

Desta forma, a interferência média normalizada pode ser escrita como:

$$\frac{\bar{I}}{NP} = \alpha \int_0^\infty \nu p(\nu) d\nu \sum_{j=1}^F \sum_{i=0}^C \frac{M_{i,j}}{f^{\lambda_j} w^{\gamma_{i,j}}} \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_{i,j}^{-\beta}(x, y, z, L, s, h) dx dy \quad (4.7)$$

onde λ_j é o número de pisos existente entre a ERM na célula adjacente no $j^{\text{ésimo}}$ piso, e a ERB da célula central. Como só temos 3 pisos e a ERB central que é nossa referência está localizada no segundo andar, λ_j só possuirá dois valores diferentes conforme visto na Tab. 4.9.

Podemos escrever a variância normalizada como:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_I^2}{NP^2} = & \alpha \int_0^\infty \nu^2 p(\nu) d\nu \sum_{j=1}^F \sum_{i=0}^C \frac{M_{i,j}}{f^{2\lambda_j} w^{2\gamma_{i,j}}} \frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{2\beta} d_{i,j}^{-2\beta}(x, y, z, L, s, h) dx dy - \\ & \left(\alpha \int_0^\infty \nu p(\nu) d\nu \right)^2 \sum_{j=1}^F \sum_{i=0}^C \frac{M_{i,j}}{f^{2\lambda_j} w^{2\gamma_{i,j}}} \left(\frac{1}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_{i,j}^{-\beta}(x, y, z, L, s, h) dx dy \right)^2 \end{aligned} \quad (4.8)$$

As Tab. 4.10 e 4.11 mostram a interferência média normalizada em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e da atividade de voz, para controle de potência realizado por uma ERB, atenuação de parede $w_{dB} = 4$ dB, e atenuação de piso $f_{dB} = 10$ dB. Podemos notar a grande diminuição do valor da interferência

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9\text{ dB}$
$\beta = 2$	0,9506	1,7032	3,3932	7,5161	18,511
$\beta = 3$	0,6114	1,0954	2,1823	4,8340	11,906

Tabela 4.10: Valor médio da interferência normalizada para as três primeiras camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, para controle de potência realizado por uma ERB, atenuação de parede $w_{dB} = 4\text{ dB}$, e atenuação de piso $f_{dB} = 10\text{ dB}$.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9\text{ dB}$
$\beta = 2$	1,1882	2,1290	4,2415	9,3952	23,139
$\beta = 3$	0,7642	1,3693	2,7279	6,0425	14,882

Tabela 4.11: Valor médio da interferência normalizada para as três primeiras camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0,5$, para controle de potência realizado por uma ERB, atenuação de parede $w_{dB} = 4\text{ dB}$, e atenuação de piso $f_{dB} = 10\text{ dB}$.

média, se compararmos com os valores obtidos nas Tab. 4.5 e 4.6 ao considerarmos agora a atenuação do piso, mostrando a grande importância desse parâmetro nos cálculos.

As Tab. 4.12 e 4.13 nos mostram a interferência média normalizada em função dos mesmos parâmetros anteriores, para controle de potência realizado por uma ERB, atenuação de parede $w_{dB} = 4\text{ dB}$, e atenuação de piso $f_{dB} = 15\text{ dB}$. Podemos notar que, agora com uma atenuação de piso ainda maior, a interferência média diminui ainda mais.

As Tab. 4.14 e 4.15 mostram o desvio padrão da interferência em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e da atividade de voz, para controle de potência realizado por uma ERB, atenuação de parede $w_{dB} = 4\text{ dB}$, e atenuação de piso $f_{dB} = 10\text{ dB}$. Assim como no caso da interferência média, a diminuição do valor do desvio padrão é grande com a consideração da atenuação de piso.

As Tab. 4.16 e 4.17 mostram o desvio padrão da interferência em função dos mesmos

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8\text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9\text{ dB}$
$\beta = 2$	0,7339	1,3150	2,6197	5,8029	14,292
$\beta = 3$	0,4473	0,8014	1,5966	3,5366	8,7101

Tabela 4.12: Valor médio da interferência normalizada para as três primeiras camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, para controle de potência realizado por uma ERB, atenuação de parede $w_{dB} = 4\text{ dB}$, e atenuação de piso $f_{dB} = 15\text{ dB}$.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 dB$
$\beta = 2$	0,9174	1,6437	3,2747	7,2537	17,865
$\beta = 3$	0,5591	1,0018	1,9958	4,4208	10,888

Tabela 4.13: Valor médio da interferência normalizada para as três primeiras camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0,5$, para controle de potência realizado por uma ERB, atenuação de parede $w_{dB} = 4$ dB, e atenuação de piso $f_{dB} = 15$ dB.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 dB$
$\beta = 2$	2,4356	7,8639	31,271	153,51	931,24
$\beta = 3$	1,9713	6,3557	25,261	123,99	752,15

Tabela 4.14: Desvio padrão da interferência para as três primeiras camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, para controle de potência realizado por uma ERB, atenuação de parede $w_{dB} = 4$ dB, e atenuação de piso $f_{dB} = 10$ dB.

parâmetros anteriores, para controle de potência realizado por uma ERB, atenuação de parede $w_{dB} = 4$ dB, e atenuação de piso $f_{dB} = 15$ dB.

4.3 Controle de Potência realizado pela ERB mais forte

Conforme mencionamos anteriormente, as equações utilizadas no capítulo anterior para controle de potência realizado por E ERBs não se apresentaram tão precisas para este caso, pois no modelo tridimensional considerado, as salas não são cúbicas, as ERMs não estão no mesmo plano das ERBs e além disso temos a atenuação de piso. Portanto, obteremos uma equação através do mesmo método utilizado no capítulo 3 na obtenção do desvio padrão do sombreamento equivalente, só que desta vez considerando toda a interferência média normalizada e seu desvio padrão.

As simulações foram feitas considerando que o móvel estivesse se comunicando com a ERB mais forte, ou seja, o controle de potência é realizado por qualquer uma das 27 ERBs

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 dB$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 dB$
$\beta = 2$	2,7175	8,7865	34,956	171,62	1041,2
$\beta = 3$	2,2006	7,1025	28,239	138,62	840,93

Tabela 4.15: Desvio padrão da interferência para as três primeiras camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0,5$, para controle de potência realizado por uma ERB, atenuação de parede $w_{dB} = 4$ dB, e atenuação de piso $f_{dB} = 10$ dB.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$\beta = 2$	2,2606	7,2944	29,000	142,36	863,57
$\beta = 3$	1,7908	5,7676	22,915	112,47	682,23

Tabela 4.16: Desvio padrão da interferência para as três primeiras camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, para controle de potência realizado por uma ERB, atenuação de parede $w_{dB} = 4 \text{ dB}$, e atenuação de piso $f_{dB} = 15 \text{ dB}$.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$\beta = 2$	2,5227	8,1507	32,419	159,15	965,49
$\beta = 3$	1,9999	6,4461	25,618	125,74	762,76

Tabela 4.17: Desvio padrão da interferência para as três primeiras camadas de células em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0,5$, para controle de potência realizado por uma ERB, atenuação de parede $w_{dB} = 4 \text{ dB}$, e atenuação de piso $f_{dB} = 15 \text{ dB}$.

(lembrando que nosso modelo possui 3 andares e 9 salas por andar), cujo sinal chega com maior potência na ERM. Desta forma, temos um modelo, em que se consideram todas as ERBs como responsáveis pelo controle de potência.

A interferência média normalizada depende, como nós já vimos, de vários parâmetros, dentre eles estão: altura da sala (h), atenuação de piso (f_{dB}), atenuação de parede (w_{dB}), desvio padrão do sombreamento ($\sigma_{\nu_{dB}}$), expoente da perda de propagação (β), e fator de atividade de voz (α). Portanto, se considerarmos que a interferência é uma função desses seis parâmetros mencionados, podemos seguir o mesmo raciocínio apresentado no capítulo 3 para a função $f(x)$ e escrever essa função de seis variáveis através de uma série de Taylor (o desenvolvimento da série de Taylor para uma função de seis variáveis pode ser visto no Apêndice A).

Denominamos de $I(h, f_{dB}, w_{dB}, \sigma_{\nu_{dB}}, \beta, \alpha)$ a função que descreve o comportamento da interferência média normalizada e de $G(h, f_{dB}, w_{dB}, \sigma_{\nu_{dB}}, \beta, \alpha)$ a função que descreve o comportamento do desvio padrão normalizado dessa interferência, e ainda, denominamos de a, b, c, d, e, f os valores nominais para $h, f_{dB}, w_{dB}, \sigma_{\nu_{dB}}, \beta, \alpha$.

Dessa forma, utilizando o mesmo raciocínio do capítulo 3, podemos representar as funções

$I(h, f_{dB}, w_{dB}, \sigma_{\nu_{dB}}, \beta, \alpha)$ e $G(h, f_{dB}, w_{dB}, \sigma_{\nu_{dB}}, \beta, \alpha)$ por:

$$\begin{aligned} I(h, f_{dB}, w_{dB}, \sigma_{\nu_{dB}}, \beta, \alpha) &= I(a, b, c, d, e, f) + \left[\frac{\partial I}{\partial h}(h - a) + \frac{\partial I}{\partial f_{dB}}(f_{dB} - b) \right. \\ &\quad + \frac{\partial I}{\partial w_{dB}}(w_{dB} - c) + \frac{\partial I}{\partial \sigma_{\nu_{dB}}}(\sigma_{\nu_{dB}} - d) \\ &\quad \left. + \frac{\partial I}{\partial \beta}(\beta - e) + \frac{\partial I}{\partial \alpha}(\alpha - f) \right] \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} G(h, f_{dB}, w_{dB}, \sigma_{\nu_{dB}}, \beta, \alpha) &= G(a, b, c, d, e, f) + \left[\frac{\partial G}{\partial h}(h - a) + \frac{\partial G}{\partial f_{dB}}(f_{dB} - b) \right. \\ &\quad + \frac{\partial G}{\partial w_{dB}}(w_{dB} - c) + \frac{\partial G}{\partial \sigma_{\nu_{dB}}}(\sigma_{\nu_{dB}} - d) \\ &\quad \left. + \frac{\partial G}{\partial \beta}(\beta - e) + \frac{\partial G}{\partial \alpha}(\alpha - f) \right] \end{aligned} \quad (4.10)$$

Assim, analogamente ao realizado na seção (3.3.2), variamos h , mantendo $f_{dB}, w_{dB}, \sigma_{\nu_{dB}}, \beta$ e α nos seus respectivos valores nominais dados por $b = f_{dB} = 20$ dB, $c = w_{dB} = 6$ dB, $d = \sigma_{\nu_{dB}} = 4$ dB, $e = \beta = 2, 5$, e $f = \alpha = 0, 45$., e obtivemos através de simulação, seis valores para a interferência média e para seu desvio padrão, formando assim seis pontos para a interferência e seis para o desvio padrão. Com isso traçamos a curva que passava por esses pontos, obtendo dois gráficos, um para a interferência média e outro para o desvio padrão.

A partir desses gráficos, nós obtivemos duas expressões: uma para o valor médio da interferência e outra para o desvio padrão dessa interferência, de forma que essas expressões nos deram curvas que se ajustaram da melhor maneira possível às curvas obtidas por simulação (método de ajuste de parâmetros). A mesma coisa foi feita para $f_{dB}, w_{dB}, \sigma_{\nu_{dB}}, \beta$ e α , totalizando seis expressões para a interferência média normalizada e seis para o desvio padrão normalizado dessa interferência.

Entretanto, quando fixamos 5 parâmetros e variamos apenas um deles, teremos novamente o caso de $f(x)$ pois há apenas uma variável em questão. Assim, conforme já explicado no capítulo 3, precisamos subtrair o valor da função no ponto (a, b, c, d, e, f) de cada uma das expressões obtidas, para escrevermos as funções dadas pelas equações (4.9) e (4.10).

As equações obtidas através desse ajuste de parâmetros, que representam cada termo da equação (4.9) são dadas pelas equações apresentadas na Tab.4.18, e cada termo da equação

$I(a, b, c, d, e, f)$	0,1654
$\frac{\partial I}{\partial h}(h - a)$	$-0,1654 + 0,1787h^{-0,0582}$
$\frac{\partial I}{\partial f_{dB}}(f_{dB} - b)$	$-0,0112 + 10^{-0,0975f_{dB}} + 10^{-0,2114f_{dB}^2}$
$\frac{\partial I}{\partial w_{dB}}(w_{dB} - c)$	$-1,6928 + 10^{-0,0306w_{dB}} + 10^{0,0005w_{dB}^2}$
$\frac{\partial I}{\partial \sigma_{\nu_{dB}}}(\sigma_{\nu_{dB}} - d)$	$0,1365 - 0,2131 \exp(-0,0278\sigma_{\nu_{dB}}^2)$
$\frac{\partial I}{\partial \beta}(\beta - e)$	$-0,1147 + 0,7225 \exp(-0,7354\beta)$
$\frac{\partial I}{\partial \alpha}(\alpha - f)$	$-0,1659 + 0,3684\alpha$

Tabela 4.18: Cada um dos termos da equação (4.9) que representa a interferência média normalizada, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.

$G(a, b, c, d, e, f)$	0,2072
$\frac{\partial G}{\partial h}(h - a)$	$-0,0012 + 0,0548h^{-2,7347}$
$\frac{\partial G}{\partial f_{dB}}(f_{dB} - b)$	$1,5080 - 1,5058 \times 10^{-0,00003f_{dB}} + 0,2359 \times 10^{-0,00687f_{dB}^2}$
$\frac{\partial G}{\partial w_{dB}}(w_{dB} - c)$	$-0,1528 + 0,1588 \times 10^{-0,1514w_{dB}} + 0,2025 \times 10^{-0,00498w_{dB}^2}$
$\frac{\partial G}{\partial \sigma_{\nu_{dB}}}(\sigma_{\nu_{dB}} - d)$	$0,1125 - 0,2336 \exp(-0,0483\sigma_{\nu_{dB}}^2)$
$\frac{\partial G}{\partial \beta}(\beta - e)$	$-0,0782 + 0,3609 \exp(-0,6122\beta)$
$\frac{\partial G}{\partial \alpha}(\alpha - f)$	$-0,0789 + 0,1758\alpha$

Tabela 4.19: Cada um dos termos da equação (4.10) que representa o desvio padrão da interferência, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.

(4.10) é representado pelas equações apresentadas na Tab.4.19. Lembrando que $a = h = 4$ m, $b = f_{dB} = 20$ dB, $c = w_{dB} = 6$ dB, $d = \sigma_{\nu_{dB}} = 4$ dB, $e = \beta = 2,5$, e $f = \alpha = 0,45$.

4.4 Simulação

Iremos comparar os resultados que nós obtivemos com as equações propostas até o momento, para controle de potência realizado por uma ERB, e pela ERB mais forte (entre as 27 ERBs existentes), com os resultados obtidos através de simulação. Utilizamos para isso um simulador na forma de um programa em linguagem C++ semelhante ao que utilizamos no capítulo 3, com as devidas alterações para um ambiente de três dimensões, para obtermos a interferência média normalizada à qual está submetida uma dada estação rádio-base no "link" reverso (no nosso caso a ERB central do segundo andar), bem como o desvio padrão normalizado dessa interferência. Os móveis foram aleatoriamente distribuídos nas 27 salas. Os valores a serem utilizados para os parâmetros: atenuação de parede e de perda de percurso, atividade de voz, atenuação de piso e desvio padrão do sombreado log-normal serão novamente baseados nos valores obtidos experimentalmente nas referências [1, 2, 3, 4].

Conforme mencionamos anteriormente, a atenuação de piso, é um parâmetro que influi bastante na capacidade do sistema, e seu valor é muito dependente do tipo de material utilizado na sua construção, variando de $10 \leq f_{dB} \leq 30$ [4].

Vale ressaltar, que todos esses valores empíricos que nós obtivemos para os parâmetros já mencionados, são válidos quando os móveis se comunicam em uma frequência de 900 MHz.

Desta forma, escolhemos como parâmetros de simulação : $L = 10$ m, $\beta = 2,5$, $w_{dB} = 4$ dB, $\alpha = 0,4$, $f_{dB} = 15$ dB e o desvio padrão do sombreamento log-normal variando de 2 dB a 7 dB. Além disso, as ERBs estão fixas a uma altura de 2,5 m, os móveis tem altura fixa de 1,0 m e a altura da sala é de $h = 3$ m.

As Fig. 4.5 e 4.6 mostram a interferência média normalizada e o desvio padrão normalizado em função do desvio padrão do sombreamento em dB, respectivamente. Podemos notar que as equações propostas para o caso em que o móvel está sendo controlado por apenas uma ERB são precisas. Isto se deve ao fato de que quando o controle de potência é realizado por uma ERB, não se utilizou nenhuma aproximação na obtenção das equações.

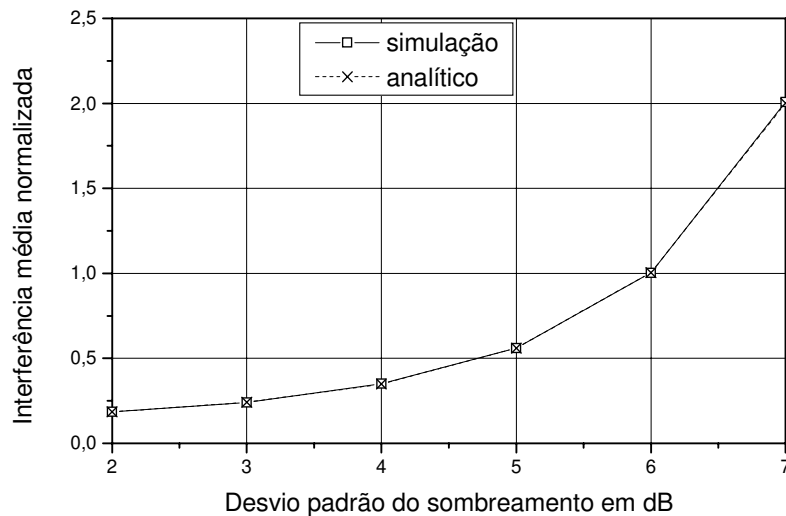


Figura 4.5: Interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento, com $\beta = 2,5$, $\alpha = 0,4$, $w_{dB} = 4$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado por uma ERB.

As Fig. 4.7 e 4.8 mostram a interferência média normalizada e o desvio padrão normaliza-

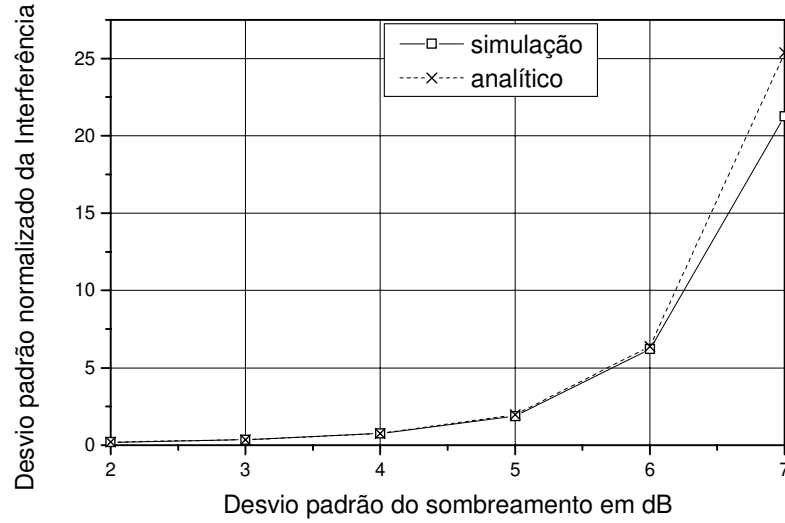


Figura 4.6: Desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento, com $\beta = 2, 5$, $\alpha = 0, 4$, $w_{dB} = 4$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado por uma ERB.

do em função do desvio padrão do sombreamento em dB, respectivamente, quando o controle de potência é realizado pela ERB mais forte. Podemos notar que as equações propostas para este caso também são precisas, demonstrando que as aproximações feitas através do método de ajuste de parâmetros são válidas.

Entretanto, precisamos analisar a precisão destas equações para os outros parâmetros, verificando também se elas continuam sendo válidas quando os valores utilizados para os parâmetros não são próximos aos valores nominais escolhidos. Lembrando que o controle de potência é realizado pela ERB mais forte. As tabelas a seguir nos dão os valores obtidos por simulação.

A Tab. 4.20 mostra a interferência média normalizada, em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, para fator de atividade de voz $\alpha = 0, 4$, para controle de potência realizado pela ERB mais forte, para atenuação de parede $w_{dB} = 4$ dB, altura da sala $h = 3$ m, e atenuação de piso $f_{dB} = 15$ dB. Verifica-se que quanto maior β menor a interferência média. Isto se deve ao fato de que quanto maior β maior será a perda de percurso, fazendo com que a interferência que atinge a célula central

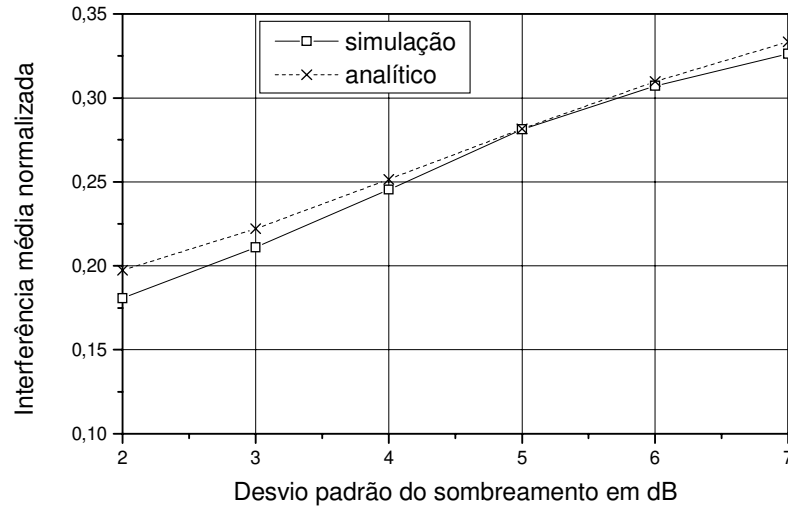


Figura 4.7: Interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento, com $\beta = 2, 5$, $\alpha = 0, 4$, $w_{dB} = 4$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$\beta = 2$	0,3534	0,3768	0,3895	0,3911	0,3912
$\beta = 3$	0,2269	0,2535	0,2738	0,2875	0,2965
$\beta = 4$	0,1606	0,1814	0,2004	0,2155	0,2280

Tabela 4.20: Valor médio da interferência normalizada para o prédio de três andares, obtido por simulação, em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, do fator de atividade de voz $\alpha = 0, 4$, para controle de potência realizado pela ERB mais forte, para atenuação de parede $w_{dB} = 4$ dB, e atenuação de piso $f_{dB} = 15$ dB, e altura da sala $h = 3$ m.

seja diminuída.

A Tab. 4.21 mostra a interferência média normalizada, em função do desvio padrão da log-normal em dB, do fator de atividade de voz, para controle de potência realizado pela ERB mais forte, para atenuação de parede $w_{dB} = 4$ dB, do expoente da perda de propagação $\beta = 3$, altura da sala $h = 3$ m, e atenuação de piso $f_{dB} = 15$ dB. Verifica-se que quanto maior o tempo de fala de cada usuário, ou seja, quanto maior α maior a interferência média que atinge a célula central.

A Tab. 4.22 mostra a interferência média normalizada, em função do desvio padrão da log-normal em dB, da atenuação de parede, para controle de potência realizado pela ERB mais forte, para fator de atividade de voz $\alpha = 0, 4$, do expoente da perda de propagação

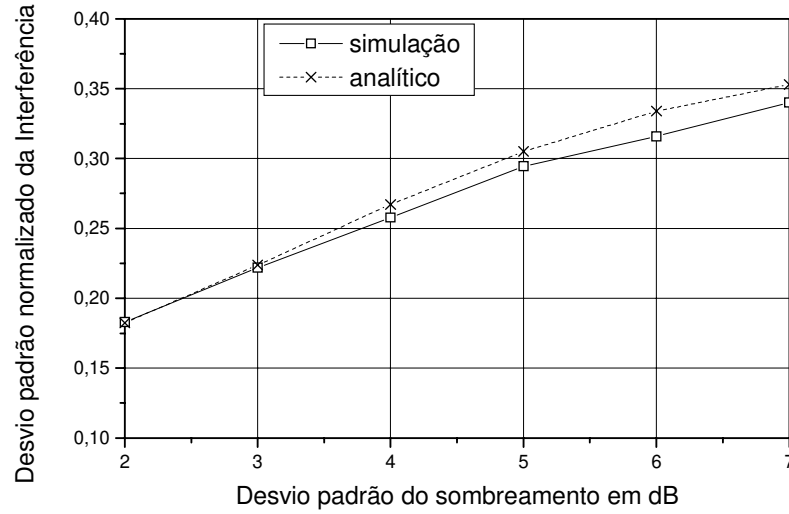


Figura 4.8: Desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento, com $\beta = 2, 5$, $\alpha = 0, 4$, $w_{dB} = 4$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5$ dB	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6$ dB	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7$ dB	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8$ dB	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9$ dB
$\alpha = 0, 5$	0,2828	0,3163	0,3418	0,3591	0,3700
$\alpha = 0, 6$	0,3399	0,3794	0,4107	0,4311	0,4440

Tabela 4.21: Valor médio da interferência normalizada para o prédio de três andares, obtido por simulação, em função do desvio padrão da log-normal em dB, do fator de atividade de voz, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, para controle de potência realizado pela ERB mais forte, para atenuação de parede $w_{dB} = 4$ dB, e atenuação de piso $f_{dB} = 15$ dB, e altura da sala $h = 3$ m.

$\beta = 3$, altura da sala $h = 3$ m, e atenuação de piso $f_{dB} = 15$ dB. Podemos notar que a atenuação de parede é um fator fundamental nos cálculos, e quanto maior a atenuação oferecida ao sinal propagado, menor será a interferência a atingir a célula central. Podemos ainda mencionar a grande diminuição da interferência comparada com os valores obtidos nas Tab. 4.10 e 4.11, pois agora o controle de potência é realizado pela ERB mais forte.

A Tab. 4.23 mostra a interferência média normalizada, em função do desvio padrão da log-normal em dB, da atenuação de piso, para controle de potência realizado pela ERB mais forte, para atenuação de parede $w_{dB} = 4$ dB, para expoente de perda de propagação $\beta = 3$, para fator de atividade de voz $\alpha = 0, 4$, e altura da sala $h = 3$ m. Assim como a atenuação de parede, quanto maior a atenuação de piso, menor será a interferência média que irá atingir

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$w_{dB} = 7 \text{ dB}$	0,1554	0,1828	0,2048	0,2223	0,2368
$w_{dB} = 10 \text{ dB}$	0,1096	0,1362	0,1591	0,1763	0,1912

Tabela 4.22: Valor médio da interferência normalizada para o prédio de três andares, obtido por simulação, em função do desvio padrão da log-normal em dB, da atenuação de parede, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, para controle de potência realizado pela ERB mais forte, e atenuação de piso $f_{dB} = 15 \text{ dB}$, e altura da sala $h = 3 \text{ m}$.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$f_{dB} = 10 \text{ dB}$	0,3023	0,3266	0,3417	0,3498	0,3530
$f_{dB} = 20 \text{ dB}$	0,1938	0,2164	0,2356	0,2493	0,2575

Tabela 4.23: Valor médio da interferência normalizada para o prédio de três andares, obtido por simulação, em função do desvio padrão da log-normal em dB, da atenuação de piso, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, para controle de potência realizado pela ERB mais forte, para atenuação de parede $w_{dB} = 4 \text{ dB}$, e altura da sala $h = 3 \text{ m}$.

a célula central.

A Tab. 4.24 mostra o desvio padrão da interferência, em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, para controle de potência realizado pela ERB mais forte, para atenuação de parede $w_{dB} = 4 \text{ dB}$, altura da sala $h = 3 \text{ m}$, e atenuação de piso $f_{dB} = 15 \text{ dB}$. Podemos verificar também a diminuição do desvio padrão com o aumento de β .

A Tab. 4.25 mostra o desvio padrão da interferência, em função do desvio padrão da log-normal em dB, do fator de atividade de voz, para controle de potência realizado pela ERB mais forte, para atenuação de parede $w_{dB} = 4 \text{ dB}$, do expoente da perda de propagação $\beta = 3$, altura da sala $h = 3 \text{ m}$, e atenuação de piso $f_{dB} = 15 \text{ dB}$.

A Tab. 4.26 mostra a interferência média normalizada, em função do desvio padrão da log-normal em dB, da atenuação de parede, para controle de potência realizado pela ERB

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$\beta = 2$	0,3307	0,3467	0,3642	0,3761	0,3887
$\beta = 3$	0,2695	0,2877	0,3093	0,3202	0,3308
$\beta = 4$	0,2279	0,2465	0,2657	0,2829	0,2921

Tabela 4.24: Desvio padrão da interferência para o prédio de três andares, obtido por simulação, em função do desvio padrão da log-normal em dB, do expoente de perda de propagação, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, para controle de potência realizado pela ERB mais forte, para atenuação de parede $w_{dB} = 4 \text{ dB}$, e atenuação de piso $f_{dB} = 15 \text{ dB}$, e altura da sala $h = 3 \text{ m}$.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$\alpha = 0,5$	0,2950	0,3163	0,3417	0,3534	0,3606
$\alpha = 0,6$	0,3275	0,3502	0,3690	0,3795	0,3891

Tabela 4.25: Desvio padrão da interferência para o prédio de três andares, obtido por simulação, em função do desvio padrão da log-normal em dB, do fator de atividade de voz, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, para controle de potência realizado pela ERB mais forte, para atenuação de parede $w_{dB} = 4 \text{ dB}$, e atenuação de piso $f_{dB} = 15 \text{ dB}$, e altura da sala $h = 3 \text{ m}$.

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$w_{dB} = 7 \text{ dB}$	0,2108	0,2421	0,2697	0,2822	0,2926
$w_{dB} = 10 \text{ dB}$	0,1741	0,2052	0,2287	0,2412	0,2512

Tabela 4.26: Desvio padrão da interferência para o prédio de três andares, obtido por simulação, em função do desvio padrão da log-normal em dB, da atenuação de parede, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, para controle de potência realizado pela ERB mais forte, para atenuação de piso $f_{dB} = 15 \text{ dB}$, e altura da sala $h = 3 \text{ m}$.

mais forte, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do expoente da perda de propagação $\beta = 3$, altura da sala $h = 3 \text{ m}$, e atenuação de piso $f_{dB} = 15 \text{ dB}$. Novamente podemos notar que com controle de potência realizado pela ERB mais forte, existe uma grande diminuição no valor do desvio padrão se comparado aos valores das Tab. 4.14 e 4.15, onde o controle de potência é realizado por apenas uma ERB. Além disso, nota-se o efeito da atenuação de parede, onde quanto maior essa atenuação menor o desvio padrão da interferência.

A Tab. 4.27 mostra o desvio padrão da interferência, em função do desvio padrão da log-normal em dB, da atenuação de piso, para controle de potência realizado pela ERB mais forte, para atenuação de parede $w_{dB} = 4 \text{ dB}$, para expoente de perda de propagação $\beta = 3$, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, e altura da sala $h = 3 \text{ m}$.

Vale lembrar que para todos os casos a ERB está situada a uma altura de 2,5m e os móveis a 1,0 m, sendo a altura da sala $h = 3 \text{ m}$. Estas mesmas considerações valem para as

	$\sigma_{\nu_{dB}} = 5 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 6 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 7 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 8 \text{ dB}$	$\sigma_{\nu_{dB}} = 9 \text{ dB}$
$f_{dB} = 10 \text{ dB}$	0,3066	0,3315	0,3521	0,3624	0,3678
$f_{dB} = 20 \text{ dB}$	0,2558	0,2710	0,2895	0,3034	0,3118

Tabela 4.27: Desvio padrão da interferência para o prédio de três andares, obtido por simulação, em função do desvio padrão da log-normal em dB, da atenuação de piso, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, e do fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, para controle de potência realizado pela ERB mais forte, para atenuação de parede $w_{dB} = 4 \text{ dB}$, e altura da sala $h = 3 \text{ m}$.

figuras a seguir.

As Fig. 4.9 e 4.10 mostram a interferência média normalizada e o desvio padrão normalizado em função do desvio padrão do sombreamento em dB, respectivamente, parametrizada em função do expoente de perda de propagação, quando o controle de potência é realizado pela ERB mais forte. Podemos notar que os resultados obtidos pela simulação e os resultados obtidos pelas expressões estão bem próximos, o que mostra a precisão alcançada com as expressões para os três casos de β .

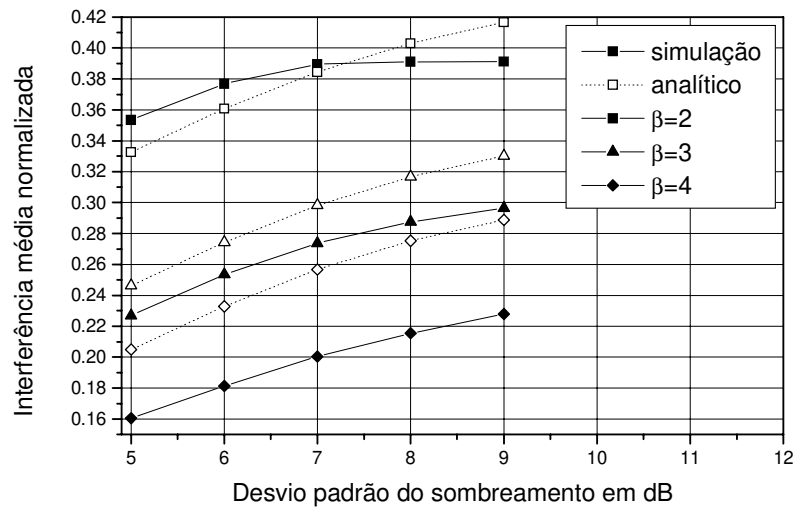


Figura 4.9: Interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento, parametrizada em função de β , para $\alpha = 0,4$, $w_{dB} = 4$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.

As Fig. 4.11 e 4.12 mostram a interferência média normalizada e o desvio padrão normalizado em função do desvio padrão do sombreamento em dB, respectivamente, parametrizada em função do fator de atividade de voz, quando o controle de potência é realizado pela ERB mais forte. Novamente podemos notar a precisão alcançada com as expressões, mostrando a validade das aproximações utilizadas.

As Fig. 4.13 e 4.14 mostram a interferência média normalizada e o desvio padrão normalizado em função do desvio padrão do sombreamento em dB, respectivamente, parametrizada

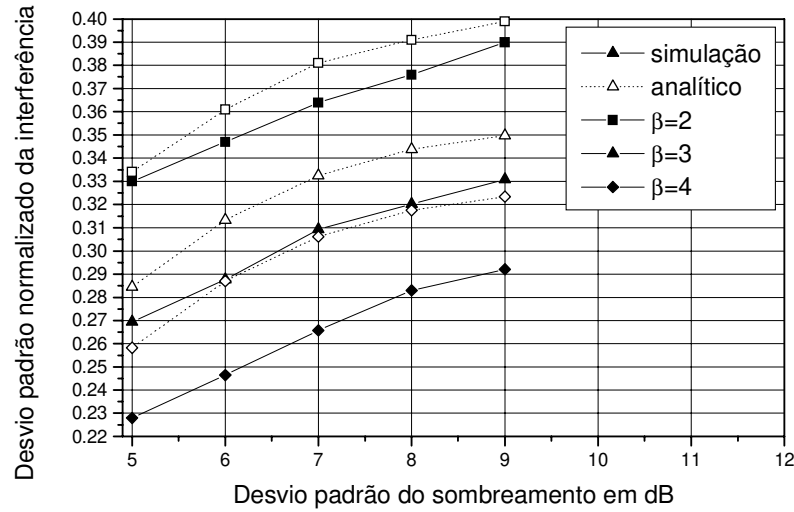


Figura 4.10: Desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento, parametrizado em função de β , para $\alpha = 0, 4$, $w_{dB} = 4$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.

em função da atenuação de parede, quando o controle de potência é realizado pela ERB mais forte. Podemos notar, além da precisão das expressões para os três casos de atenuação de parede, a influência desse parâmetro no valor da interferência média normalizada e no seu desvio padrão, mostrando que quanto maior essa atenuação menor a interferência e seu desvio padrão.

As Fig. 4.15 e 4.16 mostram a interferência média normalizada e o desvio padrão normalizado em função do desvio padrão do sombreamento em dB, respectivamente, parametrizada em função da atenuação de piso, quando o controle de potência é realizado pela ERB mais forte.

Podemos notar que as equações continuam sendo precisas, onde a maior diferença encontrada entre o valor obtido por simulação e o valor analítico é de aproximadamente 26%, mostrando a validade das aproximações feitas pelo método de ajuste de parâmetros.

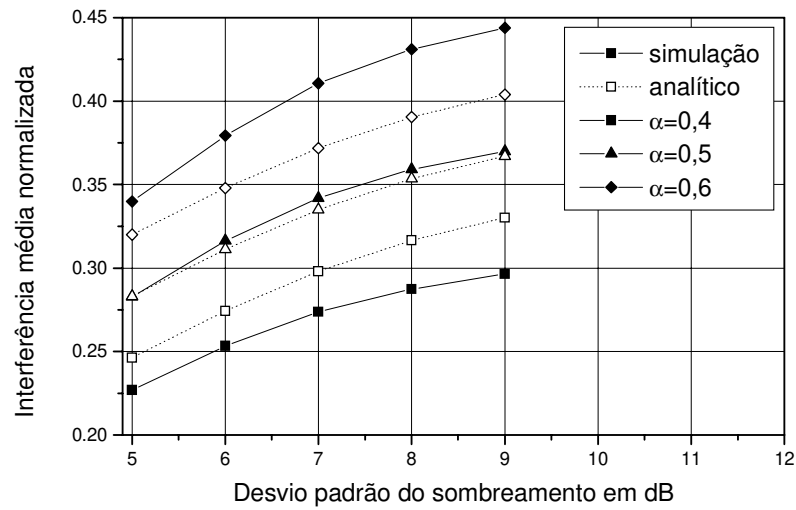


Figura 4.11: Interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento, parametrizada em função de α , para $\beta = 3$, $w_{dB} = 4$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.

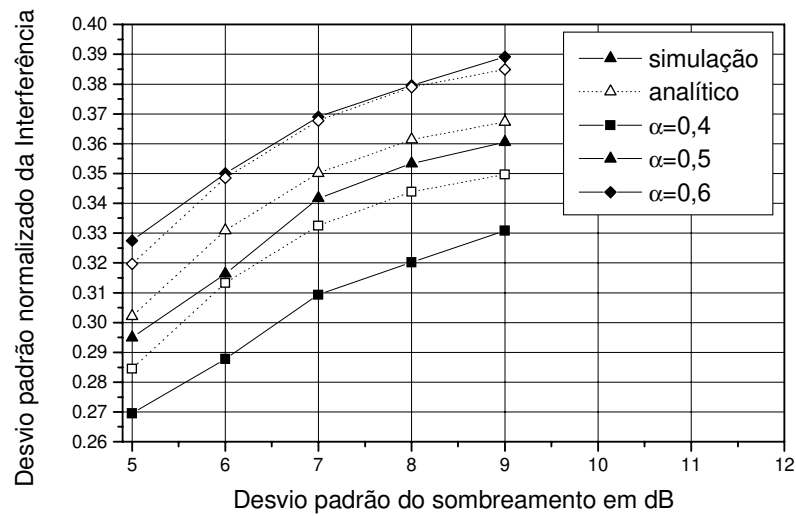


Figura 4.12: Desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento, parametrizada em função de α , para $\beta = 3$, $w_{dB} = 4$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.

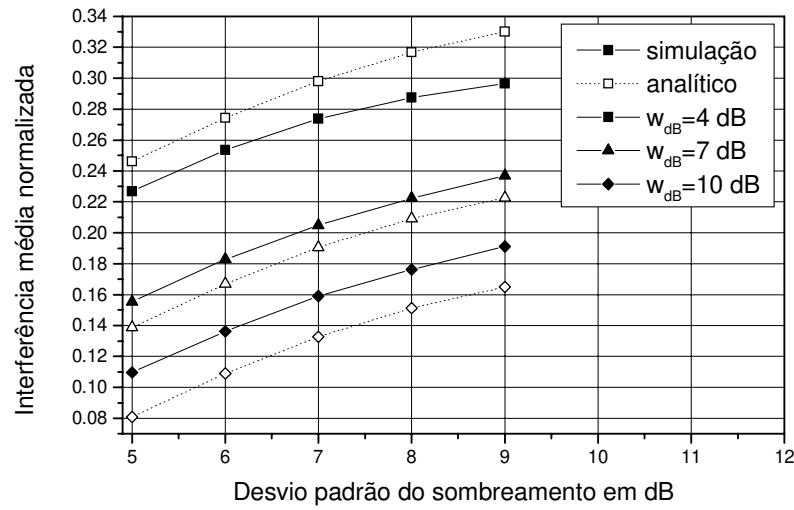


Figura 4.13: Interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento, parametrizada em função da atenuação de parede w_{dB} , para $\alpha = 0,4$, $\beta = 3$, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.

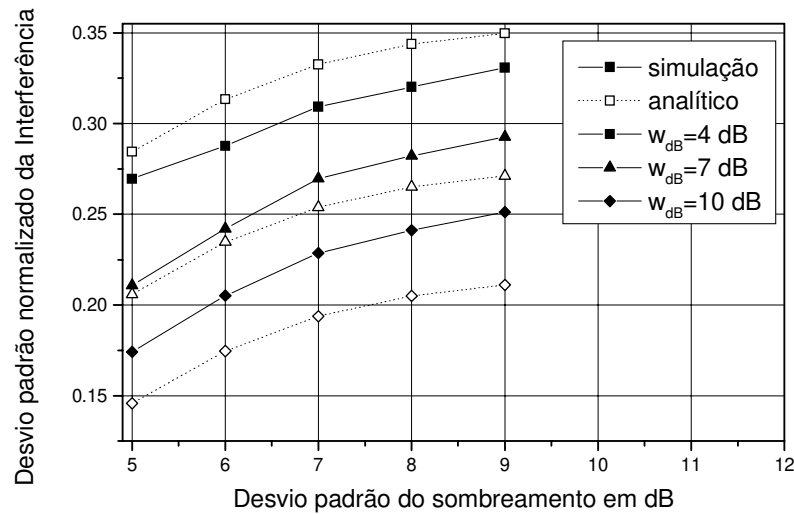


Figura 4.14: Desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento, parametrizada em função da atenuação de parede w_{dB} , para $\alpha = 0,4$, $\beta = 3$, $f_{dB} = 15$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.

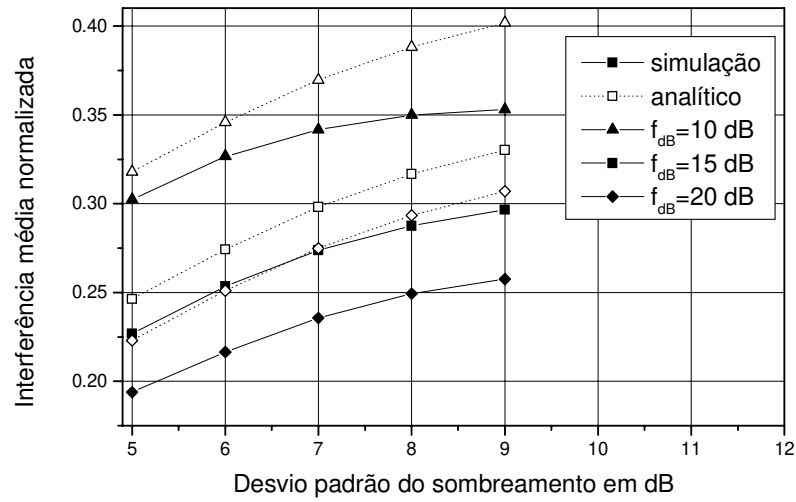


Figura 4.15: Interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento, parametrizada em função da atenuação de piso f_{dB} , para $\alpha = 0,4$, $\beta = 3$, $w_{dB} = 4$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.

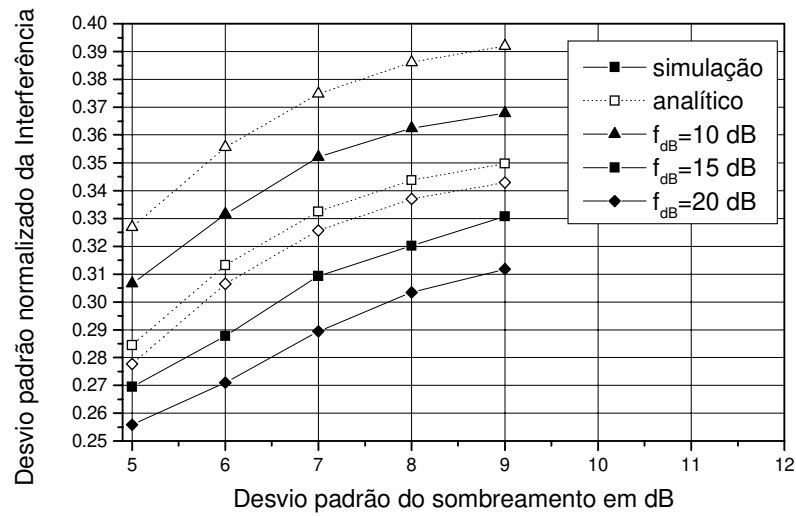


Figura 4.16: Desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento, parametrizada em função da atenuação de piso f_{dB} , para $\alpha = 0,4$, $\beta = 3$, $w_{dB} = 4$ dB, para controle de potência realizado pela ERB mais forte.

Capítulo 5

Desempenho de Sistemas CDMA

5.1 Introdução

Como sabemos, a relação sinal-interferência na recepção em sistemas CDMA é dada por:

$$\frac{C}{I} = \frac{P_U}{P_I + P_O} \quad (5.1)$$

onde P_U é a potência proveniente de um usuário de referência, P_I é a potência interferente proveniente das ERM's da mesma célula deste usuário, e P_O é a potência interferente proveniente de usuários das outras células. Vale ressaltar que as equações propostas, obtidas anteriormente, nos dão o valor médio e o desvio padrão normalizado do termo P_O . Já para o caso de P_I , sabemos que dentro da própria célula temos $(N - 1)$ usuários interferentes, transmitindo a uma potência P . Deste modo, considerando controle de potência ideal, podemos normalizar P_I e calcular sua média e desvio padrão normalizados como:

$$\begin{aligned} \frac{m_{P_I}}{(N - 1)P} &= \alpha \\ \frac{\sigma_{P_I}}{\sqrt{N - 1}P} &= \sqrt{\alpha(1 - \alpha)} \end{aligned}$$

onde α é o fator de atividade de voz apresentado na seção (3.4).

A probabilidade da perda de desempenho pode ser definida como:

$$P_{OUT} = \Pr\left(\frac{C}{I} < \frac{\gamma_b}{G_P}\right) \quad (5.2)$$

onde $\gamma_b = \frac{E_b}{I_0}$ é a relação sinal-interferência para se atingir uma certa probabilidade de erro, e G_P é o ganho de processamento.

Vamos modelar P_U e P_I em (5.1) como VAs que têm distribuição binomial, pois estamos considerando controle de potência ideal, e P_O como uma VA que tem distribuição log-normal. Como a variância de P_I é bem menor que a de P_O , podemos considerar que a VA P_O é dominante, portanto podemos dizer que a soma das VAs $P_I + P_O$ também tem distribuição log-normal. Se o controle de potência não fosse ideal, modelaríamos P_U e P_I como VAs com distribuição log-normal, e da mesma forma a soma das VAs $P_I + P_O$ também teria distribuição log-normal, pois segundo o teorema de Fenton [7], a soma de VAs log-normais dá origem a outra VA log-normal. Podemos definir a interferência total como: $P_\Sigma = P_I + P_O$. Deste modo, a interferência total tem média e desvio padrão iguais a:

$$m_\Sigma = m_{P_I} + m_{P_O} \quad (5.3)$$

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_{P_I}^2 + \sigma_{P_O}^2} \quad (5.4)$$

Lembrando que a soma da média e do desvio padrão são feitos em escala linear.

Logo, podemos calcular a probabilidade de perda de desempenho usando (5.2) como:

$$P_{OUT} = \int_0^\infty p(P_\Sigma) \int_0^{P_\Sigma \frac{\gamma_b}{G_P}} p(P_U) dP_U dP_\Sigma \quad (5.5)$$

onde $p(P_\Sigma)$, e $p(P_U)$ são as funções densidades de probabilidade das variáveis P_Σ , e P_U , respectivamente. Vale lembrar que foram utilizados nos cálculos $\gamma_b = 5$ e $G_P = 100$.

5.2 Controle Não-Ideal de Potência, Sombreamento e FAV

Nesta secção vamos obter a probabilidade de perda de desempenho para o caso em que são levados em conta o controle imperfeito de potência, o sombreamento, e a monitoração da atividade de voz. Vamos considerar dois casos, o desempenho do sistema quando consideramos o modelo do capítulo 3 (modelo 2D), e quando consideramos o modelo do capítulo 4 (modelo 3D).

5.2.1 Modelo 2D

Iremos obter a probabilidade de perda de desempenho usando (5.5). A Tab. 3.9 fornece o valor médio e o desvio padrão da potência de um usuário. As Tab. 3.15 e 3.16 fornecem o valor médio e o desvio padrão da potência de um usuário e da potência interferente dentro da própria célula, e as Tab. 3.17, Tab. 3.18, Tab. 3.19, Tab. 3.20, Tab. 3.21, Tab. 3.22 fornecem o valor médio e o desvio padrão da potência interferente devido as outras células. Vale lembrar que estamos considerando apenas as duas primeiras camadas e que o controle de potência é realizado por três ERBs.

A Fig.5.1 apresenta a probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, para $\beta = 3$, desvio padrão do erro do controle de potência de 1 dB, desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{v_{dB}} = 7$ dB, e $w_{dB} = 4$ dB. Esta figura é parametrizada em função do fator de atividade de voz. Podemos notar que o desempenho do sistema melhora com a diminuição do fator de atividade de voz. Por exemplo, para uma "outage probability" de 10^{-2} e $\alpha = 0,5$ podemos ter aproximadamente 9 usuários no sistema, já se $\alpha = 0,4$ temos um ganho em capacidade de 2 usuários.

A Fig. 5.2 apresenta a probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, para $\beta = 3$, do fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{v_{dB}} = 7$ dB, e $w_{dB} = 4$ dB. Esta figura é parametrizada em função do desvio padrão do erro do controle de potência. Esta mesma figura mostra que um erro do controle de potência acima de $\sigma = 1$ dB já causa uma deterioração considerável no sistema. Por exemplo, para uma "outage probability" de 10^{-2} , se o controle de potência for ideal podemos ter aproximadamente 14 usuários no sistema, mas com um erro de 1 dB no controle de potência, temos uma perda de capacidade de aproximadamente 3 usuários.

A Fig. 5.3 apresenta a probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{v_{dB}} = 7$ dB, do desvio padrão do erro do controle de potência igual a 1 dB, e $w_{dB} = 4$ dB. Esta curva é parametrizada em função do expoente da perda por

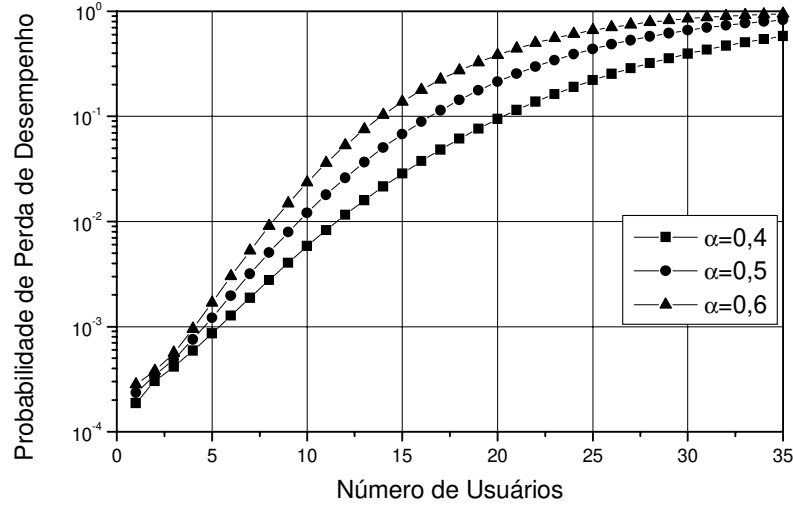


Figura 5.1: Probabilidade da perda de desempenho em função do número de usuários, parametrizada pelo fator de atividade de voz, para desvio padrão do erro do controle de potência de 1 dB, e desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{v_{dB}} = 7$ dB, $\beta = 3$, $w_{dB} = 4$ dB.

propagação. Verifica-se que quanto maior β melhor a capacidade do sistema. Por exemplo, para uma "outage probability" de 10^{-2} e $\beta = 2$ temos aproximadamente 9 usuários no sistema, e quando $\beta = 3$ tem-se um ganho de capacidade de aproximadamente 3 usuários.

A Fig. 5.4 apresenta a probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do desvio padrão do erro do controle de potência igual a 1 dB, e $w_{dB} = 4$ dB. Esta curva é parametrizada em função do desvio padrão do sombreamento. Podemos notar a grande influência do sombreamento no desempenho do sistema. Por exemplo, para uma "outage probability" de 10^{-2} e $\sigma_{v_{dB}} = 5$ dB, temos aproximadamente 16 usuários no sistema, mas se o sistema estiver sofrendo um sombreamento mais severo com $\sigma_{v_{dB}} = 7$ dB, teremos uma perda na capacidade de aproximadamente 5 usuários.

A Fig. 5.5 apresenta a probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do desvio padrão do erro do controle de potência igual a 1 dB, e

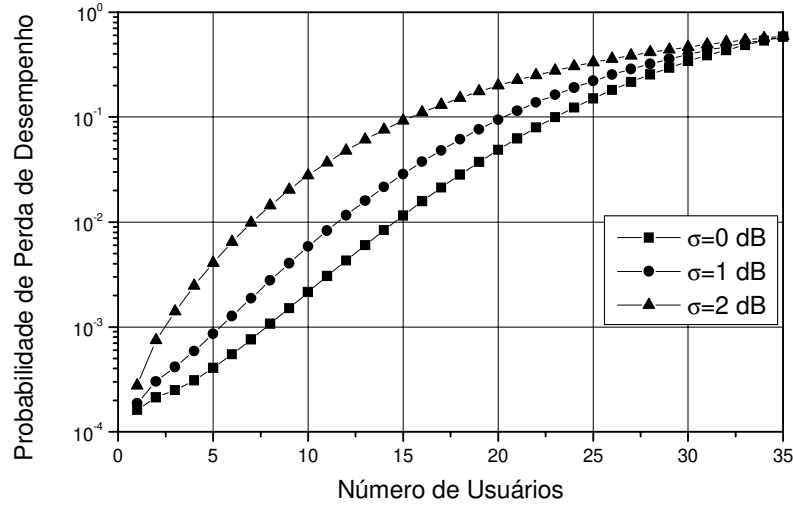


Figura 5.2: Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pelo desvio padrão do erro no controle de potência, para $\beta = 3$, do fator de atividade de voz $\alpha = 0, 4$, do desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{\nu_{dB}} = 7$ dB, e $w_{dB} = 4$ dB.

$\sigma_{\nu_{dB}} = 7$ dB. Esta curva é parametrizada em função da atenuação de parede. Podemos notar que a atenuação de parede é um parâmetro indispensável no cálculo da capacidade de sistemas CDMA em ambientes fechados, onde verifica-se que quanto maior a atenuação que a parede oferece ao sinal propagado, menor o nível de interferência que atinge a célula central e consequentemente, maior a capacidade do sistema. Por exemplo, para uma "outage probability" de 10^{-2} e $w_{dB} = 4$ dB, temos aproximadamente 11 usuários no sistema, e se a parede oferecer uma atenuação maior ao sinal, por exemplo $w_{dB} = 10$ dB, teremos um ganho na capacidade de aproximadamente 9 usuários.

A Fig. 5.6 apresenta a probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, para fator de atividade de voz $\alpha = 0, 4$, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do desvio padrão do erro do controle de potência igual a 1 dB, $\sigma_{\nu_{dB}} = 7$ dB e $w_{dB} = 4$ dB. Esta curva é parametrizada em função do número E de ERBs que participam do controle de potência. Podemos notar que a influência do número de ERBs que participam do controle de potência também é grande, principalmente quando passamos de $E = 1$ para

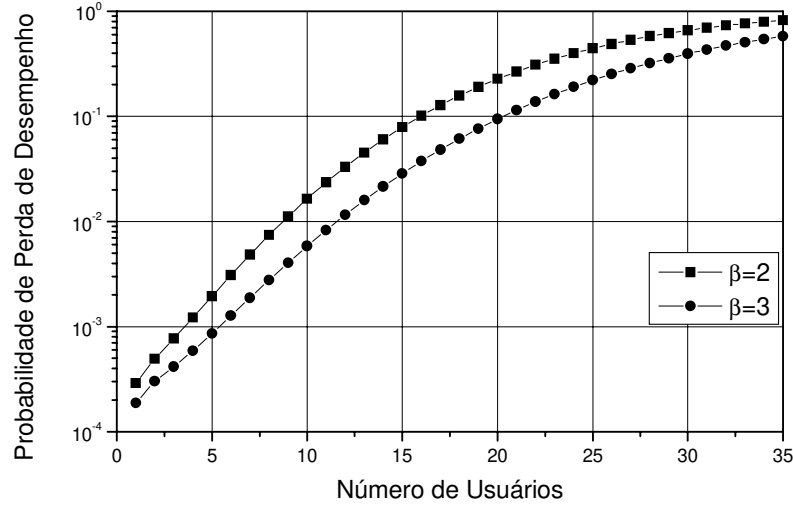


Figura 5.3: Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pelo expoente da perda de percurso, para desvio padrão do erro do controle de potência de 1 dB, do fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{\nu_{dB}} = 7$ dB, e $w_{dB} = 4$ dB.

$E = 2$, e de $E = 2$ para $E = 3$. Por exemplo, para uma "outage probability" de 10^{-2} , se tivermos controle de potência realizado por apenas uma ERB, teremos aproximadamente 1 usuário no sistema, mas se o controle de potência for realizado por três ERBs, teremos um ganho na capacidade de aproximadamente 10 usuários.

5.2.2 Modelo 3D

Também iremos obter a probabilidade de perda de desempenho usando (5.5). As Tab. 3.9, Tab. 3.15 e Tab.3.16, assim como no modelo anterior, fornecem o valor médio e o desvio padrão da potência de um usuário e da potência interferente dentro da própria célula. Usando as equações apresentadas nas Tab. 4.18 e 4.19 podemos obter o valor médio e o desvio padrão da potência interferente devido as outras células. Vale lembrar que estamos considerando que o controle de potência é realizado pela ERB mais forte.

A Fig. 5.7 apresenta a probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, para $\beta = 3$, desvio padrão do erro do controle de potência de 1 dB,

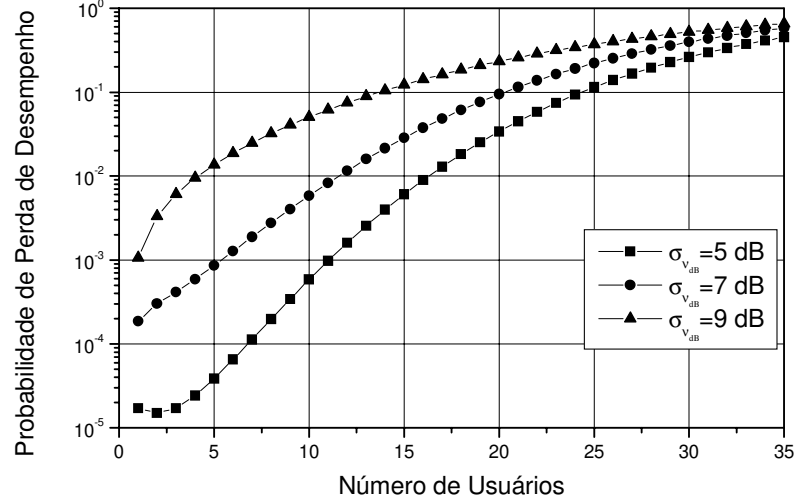


Figura 5.4: Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pelo desvio padrão do sombreamento, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do desvio padrão do erro do controle de potência igual a 1 dB, e $w_{dB} = 4$ dB.

desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{v_{dB}} = 7$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, e $w_{dB} = 4$ dB. Esta figura é parametrizada em função do fator de atividade de voz. Assim como nos casos anteriores o desempenho do sistema melhora com a diminuição deste parâmetro. Por exemplo, para uma "outage probability" de 10^{-2} e $\alpha = 0,5$ podemos ter aproximadamente 12 usuários no sistema, já se $\alpha = 0,4$ temos um ganho em capacidade de 2 usuários.

A Fig. 5.8 apresenta a probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, para $\beta = 3$, do fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{v_{dB}} = 7$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, e $w_{dB} = 4$ dB. Esta figura é parametrizada em função do desvio padrão do erro do controle de potência. Podemos perceber que este parâmetro tem uma influência maior no modelo tridimensional do que no modelo bidimensional quando analisamos a capacidade do sistema. Por exemplo, para uma "outage probability" de 10^{-2} , se o controle de potência for ideal podemos ter aproximadamente 19 usuários no sistema, mas com um erro de 1 dB no controle de potência, temos uma perda de capacidade de aproximadamente 5 usuários.

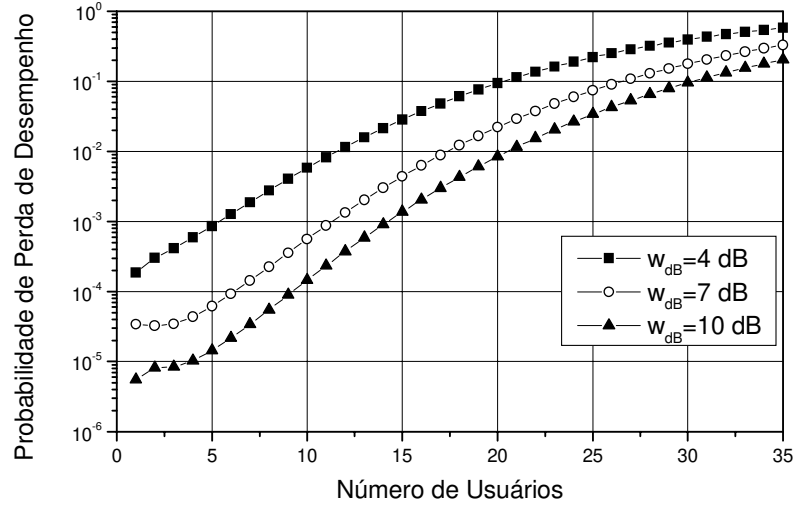


Figura 5.5: Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pela atenuação de parede, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do desvio padrão do erro do controle de potência igual a 1 dB, e $\sigma_{v_{dB}} = 7$ dB.

A Fig. 5.9 apresenta a probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{v_{dB}} = 7$ dB, do desvio padrão do erro do controle de potência igual a 1 dB, $f_{dB} = 15$ dB, e $w_{dB} = 4$ dB. Esta curva é parametrizada em função do expoente de propagação. Mais uma vez podemos notar que quanto maior β maior será a capacidade do sistema. Por exemplo, para uma "outage probability" de 10^{-2} e $\beta = 2$ temos aproximadamente 12 usuários no sistema, e quando $\beta = 4$ tem-se um ganho de capacidade de aproximadamente 3 usuários.

A Fig. 5.10 apresenta a probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do desvio padrão do erro do controle de potência igual a 1 dB, $f_{dB} = 15$ dB, e $w_{dB} = 4$ dB. Esta curva é parametrizada em função do desvio padrão do sombreamento. Podemos notar que diferentemente do que ocorre quando o controle de potência é realizado por três ERBs, a variação da capacidade do sistema não é muito grande quando variamos o

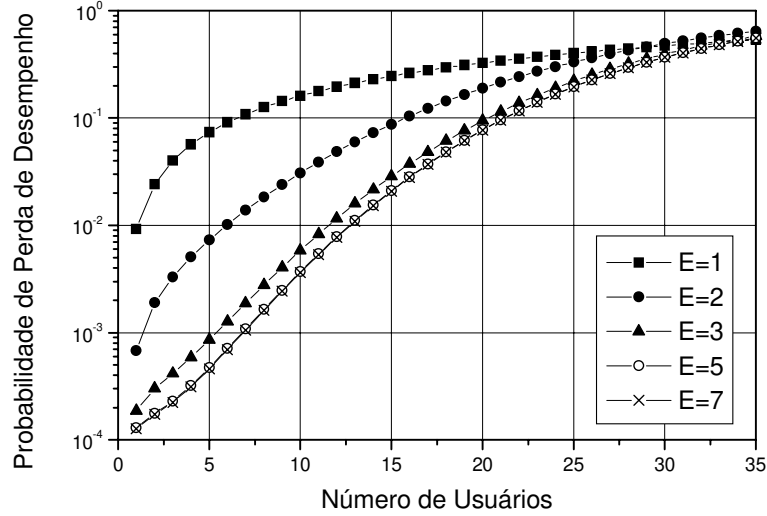


Figura 5.6: Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pelo número E de ERBs que participam do controle de potência, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do desvio padrão do erro do controle de potência igual a 1 dB, $\sigma_{v_{dB}} = 7$ dB e $w_{dB} = 4$ dB.

desvio padrão do sombreamento de 5 a 9 dB. Isto mostra que devido ao controle de potência ser realizado pela ERB mais forte, o efeito do sombreamento acaba sendo amenizado.

A Fig. 5.11 apresenta a probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{v_{dB}} = 7$ dB, do desvio padrão do erro do controle de potência igual a 1 dB, e $w_{dB} = 4$ dB. Esta curva é parametrizada em função da atenuação de piso. Podemos notar que a atenuação de piso também tem sua influência na capacidade do sistema, e assim como a atenuação de parede, quanto maior a atenuação que o piso oferece ao sinal propagado, menor a interferência que atinge a célula central e portanto, maior a capacidade do sistema. Por exemplo, para uma "outage probability" de 10^{-2} e $f_{dB} = 10$ dB, temos aproximadamente 13 usuários no sistema, e se o piso oferecer uma atenuação maior ao sinal, por exemplo $f_{dB} = 20$ dB, teremos um ganho na capacidade de aproximadamente 2 usuários.

A Fig. 5.12 apresenta a probabilidade da perda de desempenho em função do número

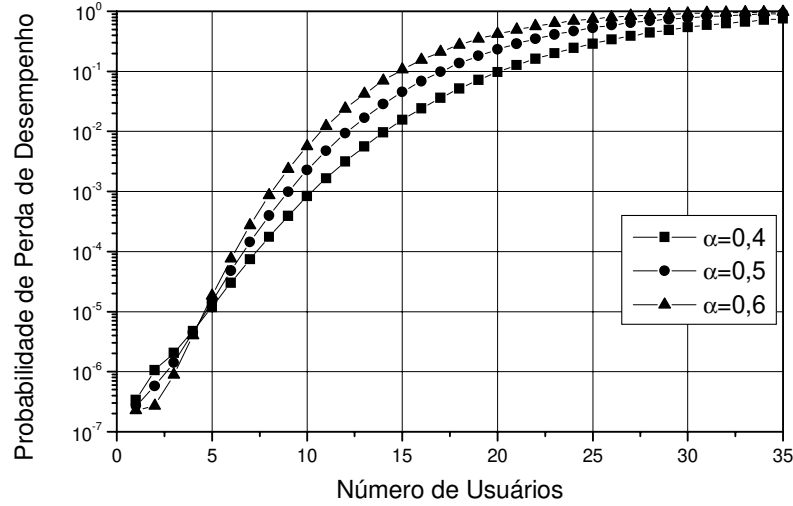


Figura 5.7: Probabilidade da perda de desempenho em função do número de usuários, parametrizada pelo fator de atividade de voz, para desvio padrão do erro do controle de potência de 1 dB, e desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{v_{dB}} = 7$ dB, $\beta = 3$, $w_{dB} = 4$ dB, e $f_{dB} = 15$ dB.

total de usuários da célula, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{v_{dB}} = 7$ dB, do desvio padrão do erro do controle de potência igual a 1 dB, e $f_{dB} = 15$ dB. Esta curva é parametrizada em função da atenuação de parede. Podemos notar que a atenuação de parede continua a ser um fator indispensável no cálculo da capacidade de sistemas CDMA em ambientes fechados. Entretanto, a influência desse parâmetro no nosso modelo tridimensional mostrou-se menor do que no modelo bidimensional. Isto se deve ao fato de que agora a topologia empregada nas células é diferente, pois temos mais de um andar, existindo portanto, uma influência conjunta entre a atenuação de piso e a de parede.

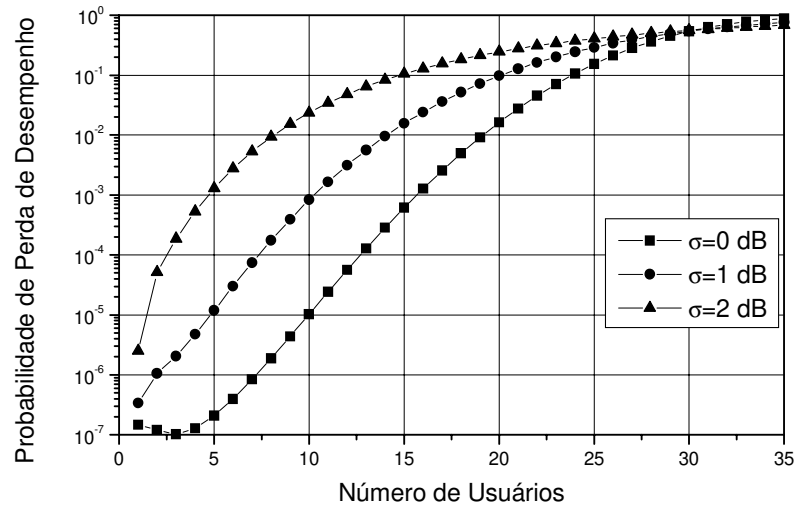


Figura 5.8: Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pelo desvio padrão do erro no controle de potência, para $\beta = 3$, do fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{\nu_{dB}} = 7$ dB, $f_{dB} = 15$ dB, e $w_{dB} = 4$ dB.

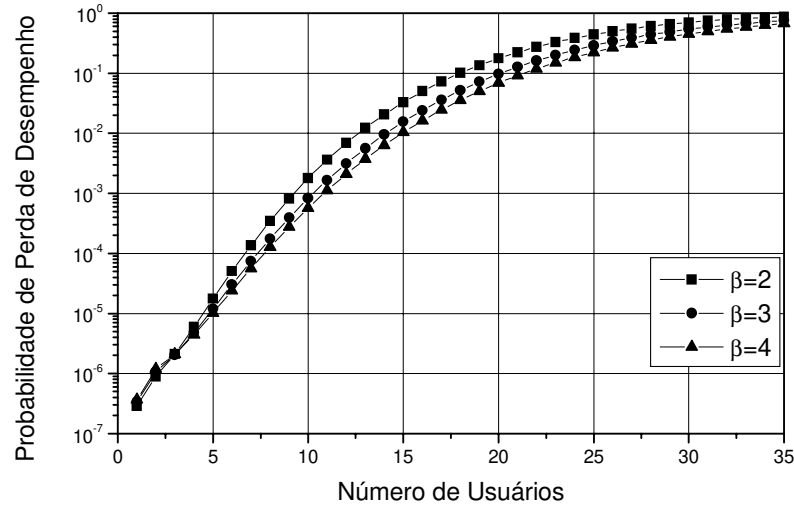


Figura 5.9: Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pelo expoente da perda de propagação, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{\nu_{dB}} = 7$ dB, do desvio padrão do erro do controle de potência igual a 1 dB, $f_{dB} = 15$ dB, e $w_{dB} = 4$ dB.

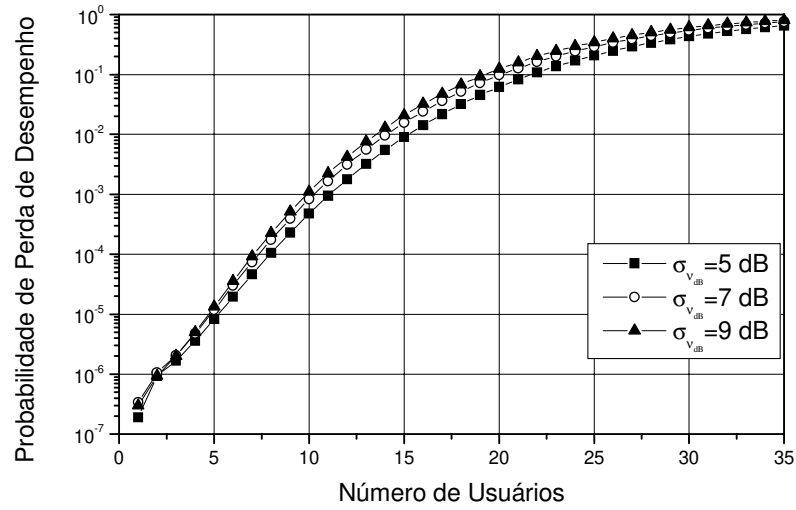


Figura 5.10: Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pelo desvio padrão do sombreamento, para fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do desvio padrão do erro do controle de potência igual a 1 dB, $f_{dB} = 15$ dB, e $w_{dB} = 4$ dB.

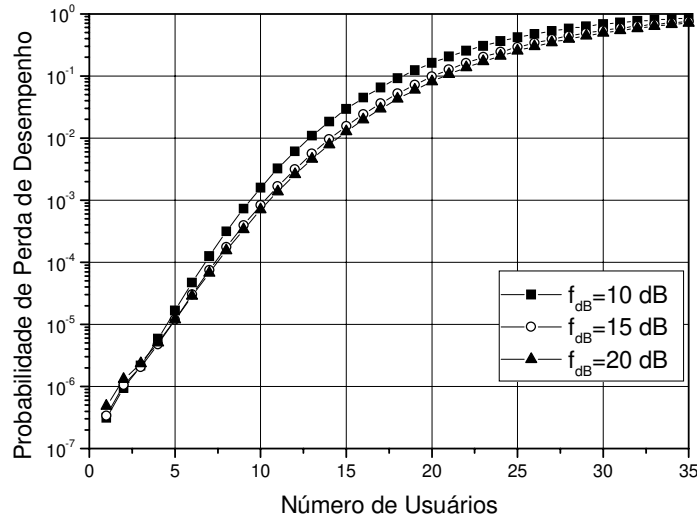


Figura 5.11: Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pela atenuação de piso, para erro do controle de potência igual a 1 dB, fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{v,db} = 7$ dB, e $w_{dB} = 4$ dB.

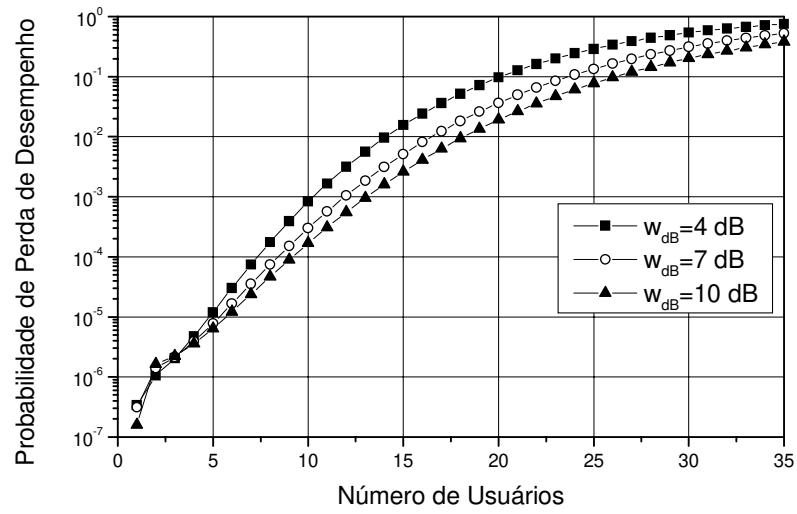


Figura 5.12: Probabilidade da perda de desempenho em função do número total de usuários da célula, parametrizada pela atenuação de parede, para erro do controle de potência igual a 1 dB, fator de atividade de voz $\alpha = 0,4$, do expoente de perda de propagação $\beta = 3$, do desvio padrão do sombreamento igual a $\sigma_{\nu_{dB}} = 7$ dB, e $f_{dB} = 15$ dB.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Introdução

Neste trabalho, foram propostas equações para a obtenção do valor analítico do sinal e da interferência proveniente da própria e de outras células, para o enlace reverso, de um sistema CDMA em ambiente fechado. Várias condições foram analisadas, tais como, controle não ideal de potência, sombreamento, monitoração da atividade de voz, expoente de perda de percurso, atenuação de parede e de piso. O desempenho analítico de sistemas CDMA também foi obtido na forma da probabilidade de perda de desempenho.

Através da análise dos dados experimentais com os dados obtidos das equações propostas para o modelo bidimensional mostrados nas Fig. 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13, verificou-se a precisão atingida pelas equações na modelagem do sistema. Verificamos, que para o caso em que temos apenas uma ERB em contato com a ERM as equações são exatas, o que já era esperado, visto que não existem aproximações para este caso. Para o caso em que temos duas ou três ERBs em contato com a ERM, as aproximações feitas mostraram-se satisfatórias, tanto no cálculo da média quanto no cálculo do desvio padrão.

Quando nós utilizamos o modelo tridimensional, ao utilizarmos as mesmas aproximações feitas para o modelo bidimensional, nós obtivemos erros maiores para o valor médio e para o desvio padrão. Isto já era esperado em virtude de termos, além das paredes entre as células, os pisos existentes entre os andares, o fato das salas não serem cúbicas e as ERMs não estarem no mesmo plano das ERBs. A solução encontrada foi então considerar que

todas as ERBs faziam parte do controle de potência, escolhendo para fins de comunicação, a ERB com melhor relação sinal-interferência, ou seja, o móvel se comunica com a ERB mais forte. Mas para isso, obtivemos equações através de uma aproximação baseada em dados empíricos obtidos por simulação do tipo Monte Carlo. Além disso, também fizemos a análise para o controle de potência realizado por uma ERB, que pode ser visto nas Fig. 4.5 e 4.6. Novamente, pudemos notar que quando temos apenas uma ERB em contato com a ERM, as equações são exatas, pois não temos aproximação para este caso.

A análise entre os dados experimentais e os obtidos pelas equações apresentadas nas Tab. 4.18 e 4.19 que consideram o modelo de três andares, podem ser vistos nas Fig. 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16. Verificou-se que essas aproximações feitas para o caso em que o controle de potência é realizado pela ERB mais forte se apresentaram de forma bastante confiável, tanto para o caso do valor médio como para o desvio padrão.

Um fator fundamental considerado é que a altura da ERB dentro da sala deve ser fixa. Se a altura da ERB acompanhasse a altura da sala, nós teríamos um comportamento indesejado, pois como a altura das ERMs dentro de cada sala é considerada fixa, quanto mais alta fosse a sala, maior seria a distância existente entre essas ERMs e a ERB da mesma sala, ou seja, maior seria a perda por propagação do sinal. Deste modo, os móveis tenderiam a se comunicar com as ERBs localizadas no piso inferior a eles, apesar de sua atenuação. Assim, as ERBs do primeiro andar estariam sobrecarregadas, pois teriam, além das ERMs do seu próprio andar, as ERMs que estão no segundo andar, e as ERBs do terceiro andar estariam sendo sub-utilizadas, com praticamente nenhum usuário se comunicando com elas. É por este motivo que nós consideramos que a altura da ERB é fixa dentro da sala.

Além disso, também foi analisada a probabilidade da perda de desempenho, "outage probability", para várias situações, mostrando que o sombreamento apresenta uma grande influência no desempenho do sistema para ambos os modelos apresentados. Uma maneira de melhorar a capacidade deste sistema, seria utilizar um arranjo linear de antenas para as ERBs na recepção do sinal, ou considerarmos a utilização de receptores com detecção

conjunta-MUD (Multiuser Detection). Fatores estes que não foram considerados neste trabalho.

6.2 Propostas de Trabalhos Futuros

Como possíveis trabalhos futuros temos:

- Calcular a capacidade para o enlace direto.
- Obter a probabilidade de perda de desempenho com o uso de um arranjo linear de antenas.
- Obter a probabilidade de perda de desempenho com o uso de receptores com detecção conjunta
- Obtenção da probabilidade de erro média por bit.

Apêndice A

Séries de Taylor

A.1 Séries de Taylor para Funções de Uma Variável

A série de Taylor é uma ferramenta muito útil quando se quer estudar a natureza de uma função na vizinhança de um ponto nominal. Neste trabalho, iremos necessitar do desenvolvimento da série de Taylor para uma função de seis variáveis, mas primeiramente vamos começar com suas definições para uma variável, e mais tarde estender este estudo para seis variáveis.

Seja $f(x)$ a soma de uma série de potências cujo intervalo de convergência é $a - r^* < x < a + r^*$ ($r^* > 0$) [12]:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n (x - a)^n, \quad a - r^* < x < a + r^*. \quad (\text{A.1})$$

onde r^* é o raio de convergência de uma série de potências tal que a série converge absolutamente quando $|x - a| < r^*$ e diverge quando $|x - a| > r^*$.

Essa série denomina-se a série de Taylor de $f(x)$ em $x = a$, se os coeficientes c_n forem dados por:

$$c_0 = f(a), \quad c_1 = \frac{f'(a)}{1!}, \quad c_2 = \frac{f''(a)}{2!}, \dots, \quad c_n = \frac{f^{(n)}(a)}{n!}, \quad ;$$

Assim temos:

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x - a) + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x - a)^n + \dots \quad (\text{A.2})$$

onde $f^{(n)}$ representa a n - ésima derivada da função $f(x)$.

A.2 Séries de Taylor para Funções de Duas Variáveis

Se tivermos uma função de duas variáveis do tipo $F(x, y)$, podemos escrever que, na vizinhança de um ponto genérico (a, b) teremos:

$$\begin{aligned} F(x, y) = & F(a, b) + \left[\frac{\partial F}{\partial x}(x - a) + \frac{\partial F}{\partial y}(y - b) \right] \\ & + \frac{1}{2!} \left[\frac{\partial^2 F}{\partial x^2}(x - a)^2 + 2 \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}(x - a)(y - b) + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}(y - b)^2 \right] \\ & + \dots + \frac{1}{n!} \left[\frac{\partial^n F}{\partial x^n}(x - a)^n + \dots \right] + \dots, \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

sendo todas as derivadas calculadas no ponto (a, b) .

A.3 Séries de Taylor para Funções de Seis Variáveis

Se tivermos uma função com seis variáveis do tipo $F(x, y, z, w, u, v)$, podemos escrever, baseado em (A.3), que na vizinhança de um ponto genérico dado por (a, b, c, d, e, f) teremos:

$$\begin{aligned} F(x, y, z, w, u, v) = & F(a, b, c, d, e, f) + \left[\frac{\partial F}{\partial x}(x - a) + \frac{\partial F}{\partial y}(y - b) + \frac{\partial F}{\partial z}(z - c) \right. \\ & + \frac{\partial F}{\partial w}(w - d) + \frac{\partial F}{\partial u}(u - e) + \left. \frac{\partial F}{\partial v}(v - f) \right] \\ & + \dots + \frac{1}{n!} \left[\frac{\partial^n F}{\partial x^n}(x - a)^n + \dots \right] + \dots, \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

sendo todas as derivadas calculadas no ponto (a, b, c, d, e, f) .

Bibliografia

- [1] A. M. D. Turkmani and A. F. Toledo, "Estimating Coverage of Radio Transmission into and within buildings at 900, 1800 and 2300 MHz", *IEEE Pers. Commun.*, pp 40-47, April 1998.
- [2] H. Hashemi, "The Indoor Radio Propagation Channel", *Proceedings of the IEEE*, vol.81, pp. 943-968, July 1993.
- [3] A. M. Saleh and R. A. Valenzuela, "A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation", *IEEE Journal Selected Areas in Communications*, vol.SAC-5, pp. 128-137, February 1987.
- [4] Theodore S. Rappaport, "Wireless Communications - Principles & Practice", *Prentice Hall PTR*, New Jersey, 1996.
- [5] A. Kajiwar, "Effects of Cell Size, Directional Antenna, Diversity and Shadowing on Indoor Radio CDMA Capacity", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.46, No.1, pp 242-247, February 1997.
- [6] William C. Y. Lee, "Mobile Cellular Telecommunications - Analog and Digital Systems", *McGraw-Hill*, 2nd edition, 1995.
- [7] L. F. Fenton, "The Sum of a Log-normal Probability Distribution in a Scattered Transmission System", *IRE Trans.*, vol.C5, pp. 56-67, Mar 1960.
- [8] Celso de Almeida, "Cálculo de Capacidade de Sistemas CDMA", *Tese de Livre Docência*, Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 1998.

- [9] Andrew J. Viterbi, Audrey M. Viterbi, and Ephraim Zehavi, "Performance of Power-Controlled Wideband Terrestrial Digital Communication", *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-41, pp. 559-569, Apr. 1993.
- [10] K. S. Gilhousen, J. M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver, and C. E. Wheatley III "On the Capacity of a Cellular CDMA System", *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-40, pp. 302-312, Aug. 1991.
- [11] Henry L. Bertoni, "Radio Propagation for Modern Wireless Systems", *Prentice Hall PTR*, New Jersey, 1st edition, 2000.
- [12] W. Kaplan, "Cálculo Avançado - V.II", Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 7^a edição, 1996.
- [13] J. G. Proakis, "Digital Communications", McGraw-Hill, New York, 3rd edition, 1993.