

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

Este exemplar corresponde a redação final da tese	
defendida por	<u>Ernesto Lopes dos Santos</u>
e aprovada pela Comissão	
Julgada em	<u>06/08/99</u>
	<u>[Assinatura]</u>
	Orientador

CÁLCULO DA CAPACIDADE DE SISTEMAS CDMA PARA USUÁRIOS DE VOZ E DADOS

Por

ERNESTO LOPES DOS SANTOS

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO DA UNICAMP COMO PARTE DOS REQUISITOS
EXIGIDOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.

Banca Examinadora :

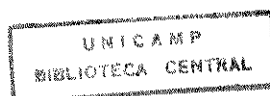
Prof. Dr. Celso de Almeida (Orientador) - FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Jaime Portugais - FEEC/UNICAMP

Dr. José Sindi Yamamoto - Fundação CPqD

Prof. Dr. Renato Baldini Filho (Suplente) - FEEC/UNICAMP

Campinas, agosto de 1999.



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	589c
V.	Ex.
TOMBO BC/	39167
PROC.	229199
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	22/10/99
N.º CPD	

CM-00136463-2

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

Sa59c Santos, Ernesto Lopes dos
Cálculo da capacidade de sistemas de CDMA para
usuários de voz e dados / Ernesto Lopes dos Santos.--
Campinas, SP: [s.n.], 1999.

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

1. Sistemas de comunicação móvel. 2. Sistemas
multimídia. 3. Telefonia celular. I. Almeida, Celso de
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Resumo

Neste trabalho calculamos a capacidade de um sistema CDMA móvel para usuários de voz e de dados. Temos o objetivo de atender aos usuários de voz com uma taxa constante de transmissão, e os usuários de dados com a maior taxa possível. Propomos alguns algoritmos para atribuir potência e definir a taxa de transmissão dos usuários de dados. Para garantir a qualidade do serviço, analisamos a probabilidade de perda de desempenho. Para tal, tivemos que calcular a estatística da interferência causada por todos os usuários do sistema, tanto internos como externos à célula. Consideramos que o móvel pode se comunicar com 9 ERBs. Analisamos o enlace do móvel à ERB, por ser este mais restritivo que o da ERB ao móvel.

Abstract

In this work the capacity of a mobile CDMA system for voice and data users is calculated. The objective is to supply the voice users with a constant bit rate, and the data users with the highest possible bit rate. Some algorithms to assign power and bit rates for the data users were proposed. To guarantee quality of service the outage probability was analyzed. For that, the statistics of the interference from all the users, both from inside and outside the cell, was calculated. It is considered that the mobile can maintain communication with 9 base stations. The uplink is analyzed since it is more restrictive than the downlink.

Aos meus pais Arnóbio e Vera,

Agradecimentos

Agradeço ao professor Celso pela dedicação, paciência, e confiança desprendidas ao meu trabalho nestes últimos dois anos. Gostaria de agradecer também

- aos demais professores da FEEC pelos bons cursos que tive a oportunidade de frequentar ;
- às pessoas que conheci na FEEC e tornaram agradável minha estadia em Campinas ;
- à CAPES pelo apoio financeiro.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Sistemas móveis CDMA	2
2	Análise de um sistema unicelular multimídia CDMA	7
2.1	Descrição dos sistema	7
2.2	Formulação Matemática	8
2.2.1	Cálculo das FDPs da interferência e do sinal desejado	8
2.2.2	Cálculo da probabilidade de perda de desempenho	12
2.3	Resultados numéricos	14
3	Interferência numa ERB em um sistema CDMA somente para voz	17
3.1	Interferência originada nas regiões em que o móvel comunica com a ERB C	19
3.1.1	Interferência originada na célula central	19
3.1.2	Interferência originada nas demais regiões onde o móvel comunica-se com a ERB central	25
3.2	Interferência originada nas regiões em que o móvel não comunica com a ERB C	29
3.3	Aproximação para provar a convergência	34
3.4	Introdução do fator de atividade de voz	36
3.5	Cálculo da capacidade do sistema CDMA	39
3.6	Redistribuição de usuários	40
4	Sistema multimídia CDMA	45
4.1	Sistema balanceado	45
4.2	Sistema desbalanceado	48
5	Resultados numéricos	53
5.1	Sistema para usuários de voz	53
5.2	Sistema multimídia	58
6	Conclusão	61

Definição de Variáveis

Capítulo 1

- $W \rightarrow$ Banda de transmissão do sinal espalhado
- $r \rightarrow$ Taxa de transmissão de bits de informação
- $S \rightarrow$ Potência do sinal desejado
- $I \rightarrow$ Potência do sinal interferente
- $\eta_o \rightarrow$ Densidade espectral de potência do ruído térmico
- $G_p \rightarrow$ Ganho de processamento
- $\gamma \rightarrow$ Relação sinal interferência
- $\gamma_{\min} \rightarrow$ Limiar mínimo da relação sinal interferência

Capítulo 2

- $W \rightarrow$ Banda de transmissão do sinal espalhado
- $\gamma_V \rightarrow$ Relação sinal interferência para um usuário de voz
- $\gamma_D \rightarrow$ Relação sinal interferência para um usuário de dados
- $\gamma_{V \min} \rightarrow$ Limiar mínimo da relação sinal interferência para um usuário de voz
- $\gamma_{D \min} \rightarrow$ Limiar mínimo da relação sinal interferência para um usuário de dados
- $P_V \rightarrow$ Potência nominal de um usuário de voz que chega à ERB
- $P_D \rightarrow$ Potência nominal de um usuário de dados que chega à ERB
- $I_V \rightarrow$ Potência interferente em um usuário de voz
- $I_D \rightarrow$ Potência interferente em um usuário de dados
- $n_V \rightarrow$ Número de usuários de voz
- $n_D \rightarrow$ Número de usuários de dados
- $r_V \rightarrow$ Taxa de transmissão dos usuários de voz
- $r_D \rightarrow$ Taxa de transmissão dos usuários de dados
- $\eta_i \rightarrow$ Variável aleatória binomial para modelar a atividade de voz
- $\lambda \rightarrow$ Fator de atividade de voz
- $z_i \rightarrow$ Variável aleatória log-normal para modelar o erro no controle de potência
- $z \rightarrow$ Variável aleatória log-normal para modelar o erro no controle de potência do sinal desejado
- $\sigma_z = \sigma_{cp} \rightarrow$ Desvio padrão do erro no controle de potência, em dB
- $\varepsilon \rightarrow$ Variável aleatória Gaussiana usada para gerar uma log-normal
- $\overline{I_{fix}} \rightarrow$ Média estabelecida para a potência do sinal interferente
- $\psi \rightarrow$ Parâmetro para reduzir a média da interferência à medida que aumenta a variância

Capítulos 3, 4 e 5

$W \rightarrow$ Banda de transmissão do sinal espalhado

$\beta \rightarrow$ Expoente de perda de propagação

$\eta \rightarrow$ Variável aleatória binomial para modelar a atividade de voz

$\lambda \rightarrow$ Fator de atividade de voz

$r_i \rightarrow$ Distância do móvel à ERB_i

$r_g \rightarrow$ Distância do móvel à ERB_C , g varia de 1 a 9, de acordo com a origem do sistema de coordenadas

$\varepsilon_i \rightarrow$ Variável aleatória Gaussiana, tal que $10^{\varepsilon_i/10}$ seja o sombreamento à ERB_i

$\alpha_i \rightarrow$ Atenuação do canal do móvel à ERB_i

$\sigma_s \rightarrow$ Desvio padrão de ε_i , ou seja, do sombreamento em dB

$P_V \rightarrow$ Potência nominal de um usuário de voz que chega à ERB

$P_D \rightarrow$ Potência nominal de um usuário de dados que chega à ERB

$P_t \rightarrow$ Potência transmitida pelo móvel

$z_{cp} \rightarrow$ Variável aleatória log-normal para modelar o erro no controle de potência

$R \rightarrow$ Metade da distância entre 2 $ERBs$ adjacentes

$A \rightarrow$ Área de um hexágono

$a \rightarrow$ Área de uma região triangular

$n_V \rightarrow$ Número de usuários de voz

$n_D \rightarrow$ Número de usuários de dados

$n_{VC_{\max}} \rightarrow$ Número máximo de usuários de voz em uma célula

$n_R \rightarrow$ Número de regiões triangulares com usuários de dados

$n_{DR} \rightarrow$ Número de usuários de dados na região triangular

$r_V \rightarrow$ Taxa de transmissão dos usuários de voz

$r_D \rightarrow$ Taxa de transmissão dos usuários de dados

$d_k \rightarrow$ Distância do móvel à ERB_C , quando esta não está entre as 9 mais próximas

$\alpha_k \rightarrow$ Atenuação do móvel à ERB_C , quando esta não está entre as 9 mais próximas

$z_s \rightarrow$ Sombreamento do móvel à ERB_C , quando esta não está entre as 9 mais próximas

$D \rightarrow$ Distância entre a ERB_C e a ERB que é a origem do sistema de coordenadas, quando a ERB_C não está entre as 9 mais próximas

$I_u \rightarrow$ Interferência causada por um usuário em um ponto dado

$I_{int} \rightarrow$ Interferência originada nas regiões onde o móvel pode se comunicar com a ERB_C

$\overline{d^{-\beta}} \rightarrow$ Média da distância elevada a $-\beta$ de todos os pontos de um hexágono até a ERB_C

$\overline{d^{-2\beta}} \rightarrow$ Média da distância elevada a -2β de todos os pontos de um hexágono até a ERB_C

$E_H\{I\} \rightarrow$ Esperança da interferência originada em um hexágono, normalizada por $\overline{d^{-\beta}}$

$\sigma_H^2 \rightarrow$ Variância da interferência originada em um hexágono, normalizada por $\overline{d^{-2\beta}}$

$\gamma_V \rightarrow$ Relação sinal interferência para um usuário de voz

$I_{\max} \rightarrow$ Interferência máxima suportada em uma ERB

$I_{C_{\max}} \rightarrow$ Interferência máxima originada em uma célula na ERB em seu centro

$I_C \rightarrow$ Interferência atual originada em uma célula na ERB em seu centro

$I_{R_{\max}} \rightarrow$ Interferência máxima originada em uma região na ERB no centro desta célula

$I_{c,i,r} \rightarrow$ Interferência causada por um usuário em uma ERB de índice (c, i, r)

Capítulo 1

Introdução

Com a versatilidade da sociedade moderna e a consequente rapidez no fluxo das informações, a necessidade de uma forma de comunicação pessoal multimídia móvel é maior a cada dia. As pessoas não querem mais apenas um terminal de voz que possam levar consigo. Cada vez mais, elas têm necessidades multimídia como : ler e passar e-mails, ter acesso a uma página na internet ou consultar um banco de dados da empresa enquanto estão fora de seus escritórios, ou de suas casas. O crescente desenvolvimento tecnológico na área de telecomunicações torna possível que a sociedade tenha acesso aos serviços de comunicação móvel multimídia. Os sistemas que permitem tal acesso são conhecidos como sendo de terceira geração.

Os sistemas de comunicações móveis hoje existentes são direcionados para atender usuários de voz. Obviamente, pode-se conectar um computador portátil a um terminal telefônico móvel e transmitir-se dados. Surge, entretanto, o problema de baixa velocidade de transmissão, pois como a voz requer velocidade com média constante e relativamente baixa, então os usuários que desejarem transmitir dados estarão restritos a baixas taxas de transmissão. Neste trabalho, propomos formas de aumentar a taxa de transmissão dos usuários de dados. Consideramos que os usuários que não estão transmitindo voz estejam transmitindo dados, e que quanto mais rápido forem transmitidos melhor para o usuário. Portanto estamos desconsiderando os casos onde o usuário tem necessidade de uma taxa de transmissão constante ou pouco variável, que seria o caso de usuários de vídeo difusão, ou de uma rádio transmitida pela internet. Estamos considerando a situação onde deseja-se transmitir um número limitado de bits de informação entre dois pontos. Com isto abrangemos conexões como : consultar e-mails, transmissão de arquivos, consulta a páginas na internet, etc. Como nosso objetivo é fornecer a estes usuários a maior taxa possível de transmissão, quanto maior for esta taxa, menos tempo eles permanecerão conectados e liberarão recurso para outros usuários.

Os sistemas de comunicações móveis podem ser analógicos ou digitais, estes por sua vez são encontrados com tecnologia TDMA (Time Division Multiple Access) ou CDMA (Code Division Multiple Access). Em nossos trabalho, analisaremos um sistema CDMA. Neste capítulo introdutório faremos uma breve descrição de sistemas móveis CDMA.

No segundo capítulo analisaremos um sistema multimídia CDMA unicolor, calcularemos a capacidade deste sistema em termos do número de usuários de voz e de dados, bem como a taxa de transmissão dos usuários de dados, a qual está intimamente associada com a potência transmitida, para a qual propomos valores ótimos, que possibilitem uma máxima taxa de transmissão aos usuários de dados e mantenha a qualidade da comunicação. Calculamos a função densidade de probabilidade (FDP) do sinal desejado e do sinal interferente, comparamos estes resultados teóricos com simulações computacionais, e mostramos que nossa teoria está consistente. Estimamos a capacidade do sistema, com base na probabilidade de perda de desempenho, “Outage Probability” (OP), procurando o maior número de usuários que possamos atender, mantendo a OP abaixo de um limiar máximo. Na transmissão da estação rádio base (ERB) para o móvel (“downlink”) tem-se os sinais dos usuários sincronizados, ao contrário das transmissões dos móveis para a ERB (“uplink”), onde os sinais chegam à ERB fora de sincronismo. Como o sincronismo entre os sinais aumenta a capacidade do sistema CDMA, a capacidade é limitada no “uplink”. Além disso, no “downlink” os sinais chegam ao móvel com a mesma potência; já no “uplink” tem-se que dispor de um algoritmo de controle de potência imperfeito, diminuindo ainda mais a capacidade do “uplink” em relação ao “downlink”. Portanto, neste trabalho, analisaremos a transmissão dos móveis para a ERB.

No terceiro capítulo desenvolveremos um método para calcular a interferência na ERB, gerada na própria célula e nas demais células do sistema. Este cálculo de interferência proveniente das demais células é polêmico e bastante discutido na literatura [1], [2], [3], [4]. Portanto, desenvolvemos o nosso próprio cálculo, para um sistema constituído de usuários de voz, e comparamos com os resultados existentes na literatura.

No quarto capítulo adaptamos os resultados do capítulo três para um sistema multimídia, e também propomos uma forma de atribuir potência aos usuários de dados.

No quinto capítulo analisaremos os resultados numéricos, e compararemos com os resultados encontrados na literatura. O sexto capítulo será de conclusões.

1.1 Sistemas móveis CDMA

A tecnologia CDMA consiste em uma forma de espalhamento espectral do sinal. Ela é bastante robusta à propagação em canais com múltiplos percursos e permite que diversos usuários compartilhem a mesma faixa de frequências. Cada usuário do sistema possui um código, que é uma sequência pseudo-aleatória de bits. Esta possui baixa correlação com a sequência de qualquer outro usuário. Um bit de informação a ser transmitido é multiplicado por esta sequência, e transmitido no canal. A duração de um bit de informação é T , e de um bit da sequência pseudo-aleatória é T_c , sendo a razão T/T_c um número inteiro. Para recuperar o sinal original, multiplica-se o sinal recebido, que é a soma dos sinais de todos os usuários, pela sequência do usuário cujo sinal se deseja recuperar. Como as sequências possuem pequena correlação entre si, os sinais dos demais usuários quando multiplicados pela sequência código original resultarão em sinais aleatório com baixa média, que para o sinal desejado será interferência. Se não houvessem percursos múltiplos e os sinais transmitidos de

todos usuários estivessem sincronizados com relação às sequências pseudo-aleatórias, e todas as sequências fossem perfeitamente ortogonais, então quando multiplicássemos uma sequência pela soma dos sinais transmitidos teríamos somente o sinal desejado sem interferência. Pode-se, então, argumentar que poderíamos multiplicar quantos sinais quiséssemos por sequências pseudo-aleatórias e transmitir num canal sem percursos múltiplos e teríamos, então, um canal com capacidade infinita! Neste caso, estaríamos derrubando o teorema de Shanon, e portanto estamos cometendo algum erro. O número de sequências ortogonais é limitado, de acordo com seu comprimento, e para termos um número infinito de sequências ortogonais teríamos que ter sequências de comprimento infinito, o que implicaria em um sinal de banda infinita. Como temos múltiplos percursos e as sequências não são ortogonais entre si, à medida que aumentamos o número de usuários no sistema, aumentamos também a interferência, de forma que o sistema CDMA é limitado em número de usuários, como era de se esperar.

A relação sinal ruído instantânea em um sistema CDMA é dada por [7].

$$\gamma = \frac{E_b}{N_o} = \frac{W}{r} \frac{S}{I + W\eta_o} \quad (1.1)$$

onde W é a banda do sinal espalhado, S é a potência instantânea do sinal desejado, r é a taxa de transmissão do sinal original, I é a soma das potências instantâneas dos outros usuários, e η_o é a densidade espectral de potência do ruído térmico. Como o sinal é espalhado em frequência, a banda W é muito maior que r . A razão

$$G_p = \frac{W}{r} \quad (1.2)$$

é conhecida por ganho de processamento e é muito maior que um. Ela também pode ser expressa por T/T_c . Podemos ter a potência do sinal desejado menor que a potência interferente e após o desespalhamento no receptor, que é a multiplicação do sinal recebido pela sequência código pseudo-aleatória, teremos uma relação sinal interferência G_p vezes maior. A potência do ruído térmico geralmente é muito menor que a potência dos demais sinais, logo pode ser desprezada na expressão (1.1). Assim, teremos

$$\gamma = G_p \frac{S}{I} \quad (1.3)$$

Como a propagação é atmosférica, os sinais estarão submetidos ao desvanecimento e terão potências não determinísticas. Portanto, as variáveis S e I da expressão (1.3) são variáveis aleatórias e terão tratamento probabilístico.

Em sistemas digitais a relação sinal ruído reflete diretamente na probabilidade de erro de bit “Bit Error Ratio” (BER). Assim, é importante que ela esteja acima de um limiar mínimo $\gamma_{\min}$. Nos resultados numéricos desta dissertação usaremos $\gamma_{\min} = 7$ dB como usado em [1], [2]. Como as variáveis S e I são aleatórias e poderão assumir qualquer valor positivo de zero a infinito, não poderemos garantir que γ esteja sempre acima de $\gamma_{\min}$, portanto podemos

calcular a probabilidade de γ ser inferior ao limiar, ou seja, a probabilidade de perda de desempenho. Nos cálculos apresentados buscaremos alcançar a probabilidade de 1%.

Numa conversação telefônica, a voz não fica ativa todo o tempo, possui intervalos de silêncio. Estudos demonstram que a voz só é ativa de 35% a 40% do tempo [5]. Em sistemas CDMA, pode-se aproveitar estes intervalos de silêncio e baixar-se a potência do sinal transmitido, dessa forma diminui-se a interferência gerada e pode-se aumentar a capacidade do sistema.

Para um sistema CDMA funcionar é necessário que a interferência sobre cada usuário esteja abaixo do limiar, portanto as potências dos usuários que chegam a ERB devem ser iguais, caso contrário alguns usuários estariam com ótima relação sinal ruído, mas gerando interferência desnecessária nos demais usuários. Para que os sinais de todos os usuários cheguem na ERB com a mesma potência, os sistemas CDMA são dotados de algoritmos de controle de potência, de forma que a potência de um usuário afastado da ERB chegue com a mesma intensidade da de um usuário próximo. No entanto, o sistema de controle de potência não é capaz de compensar o desvanecimento do canal em tempo real, pois o desvanecimento é rápido. Tem-se, então, erro no controle de potência, o qual será modelado por um variável aleatória (VA) de distribuição log-normal com média logaritmica nula, $E\{\log z\} = 0$, onde z é o erro no controle de potência, e desvio padrão de 1 dB.

Como os usuários estão em movimento, a atenuação do canal varia, conforme os obstáculos encontrados no percurso do sinal do móvel à ERB. Enquanto um usuário se movimenta pode surgir um prédio no percurso do sinal ou passar um caminhão, sendo que estes obstáculos fazem variar a atenuação do canal. Este fenômeno é conhecido por sombreamento, que também pode ser modelado por uma VA log-normal de média logaritmica nula, contudo seu desvio padrão é maior que o do erro no controle de potência e depende do ambiente de propagação. Salvo no capítulo de análise dos resultados, usaremos desvio padrão de 8 dB. O sombreamento só precisa ser considerado quando calcularmos a interferência nas demais ERBs, pois com a ERB a qual o móvel estiver conectado, o controle de potência irá anular os efeitos do sombreamento, deixando somente o erro no controle de potência.

A propagação pelo ar sofre atenuação que é proporcional à distância elevada a um expoente de perda de propagação β . Como o sombreamento, este parâmetro também depende do ambiente de propagação. Conforme a teoria eletromagnética, no espaço livre $\beta = 2$. Pode-se usar este valor para um ambiente rural aberto. No entanto os sistemas de comunicações móveis visam principalmente ambientes urbanos e nestes ambientes têm-se perda maior. Assim, usaremos $\beta = 4$ conforme a literatura [1], [2].

Como a atenuação é proporcional à distância na quarta potência pode-se achar que a ERB mais próxima de um móvel terá sempre o canal com a menor atenuação. Isso nem sempre é verdade, pois os canais estão sujeitos a sombreamento, que por sua vez possuem grandes variações. Por exemplo, entre um móvel e uma ERB fisicamente próximos pode haver um prédio provocando um forte sombreamento. Outra ERB, mais distante, pode ter menor sombreamento, de forma que o canal de comunicação a esta ERB tenha menor atenuação. O sistema não pode ignorar que uma ERB distante do móvel pode ter um canal

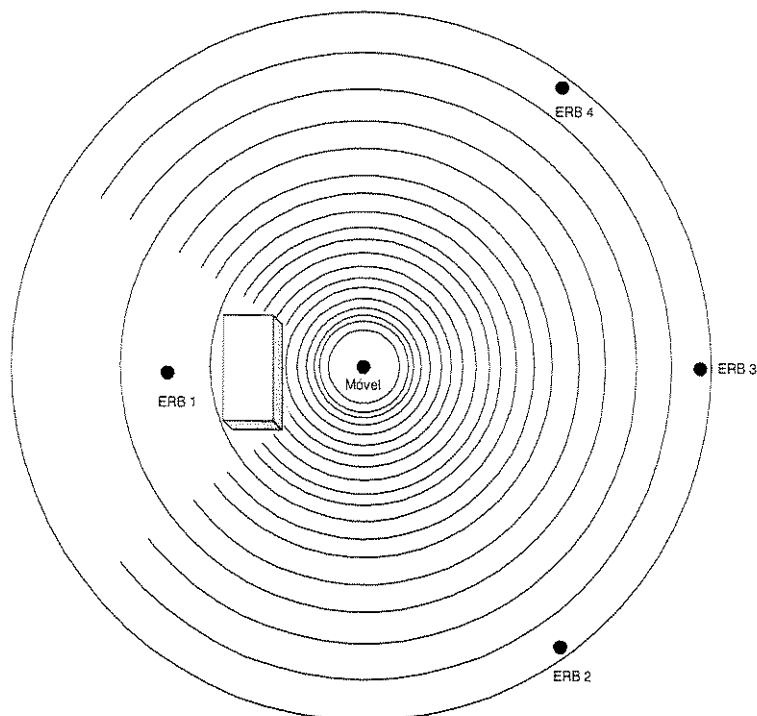


Figura 1.1: Exemplo de um móvel insistindo em manter-se conectado à ERB 1, mais próxima, porém sob sombreamento severo, gerando grande interferência nas demais ERBs.

de comunicação favorável, e insistir em mantê-lo conectado à ERB mais próxima, aumentando exageradamente a potência irradiada e consequentemente a interferência. Desta forma, pode-se prejudicar seriamente as comunicações nas células vizinhas, principalmente nesta segunda ERB. Na própria célula não surge nenhum problema, pois se está apenas aumentando a potência irradiada de forma a anular o sombreamento. O problema é que a antena do móvel irradia sinal em todas as direções e os canais para as demais ERBs podem estar com pouco sombreamento como mostrado na Fig. 1.1. Esta potência exageradamente alta pode aumentar a interferência para níveis acima do suportado em outras ERBs. Em 1991 Gilhousen et al. [2] desenvolveram os cálculos considerando que o móvel estaria conectado à ERB mais próxima, sobrestimando a interferência. Para corrigir este erro, introduziram uma função para ponderar a interferência.

Para que um sistema CDMA seja viável, é necessário que seja monitorada a atenuação dos canais de transmissão do móvel às outras ERBs, e que ele sempre esteja conectado à ERB de menor atenuação. Na literatura existe certa discordância quanto ao número de ERBs que o móvel deve monitorar a atenuação do canal, encontramos valores que vão de 3 à 19 [1], [3], [4]. Nesta dissertação usaremos 9 ERBs, quando entraremos em mais detalhes no capítulo 4.

Capítulo 2

Análise de um sistema unicelular multimídia CDMA

Neste capítulo consideramos um sistema de comunicação móvel CDMA suportando duas mídias : voz e dados. Analisaremos um sistema composto por uma única ERB, ou seja, desconsideraremos a interferência proveniente das células adjacentes. Calcularemos a capacidade do sistema, em termos da quantidade de usuários de voz e da taxa de transmissão dos usuários de dados. Nos próximos capítulos iremos analisar a interferência das outras células para depois compararmos com os resultados iniciais aqui obtidos.

Apresentamos o cálculo da função densidade de probabilidade da interferência multimídia e calculamos a probabilidade de perda de desempenho, como forma de garantir qualidade de serviço (QoS). O objetivo do nosso sistema multimídia é atender os usuários de voz com taxa de bits constante e determinada QoS, que será um limite máximo na probabilidade de perda de desempenho, “Outage Probability” (OP). Desejamos atender os usuários de dados com uma máxima taxa de bits e também com um limite máximo na OP. Analisaremos o enlace reverso incluindo imperfeição no controle de potência e monitorização da atividade de voz, porém desprezando o efeito do ruído térmico. Através da análise da OP apresentamos valores ótimos para a potência que chega na ERB e para a taxa de bits dos usuários de dados em função do número de usuários no sistema.

2.1 Descrição dos sistema

A célula tem usuários de voz e usuários de dados. O sistema deve atender aos usuários de voz com uma taxa de bit constante e uma OP especificada, ou seja, $\text{Prob}\{\gamma_V < \gamma_{V \min}\}$, onde $\gamma_{V \min}$ é o limiar da relação sinal ruído para usuários de voz. A potência de um usuário de voz que chegaria à ERB, se não houvesse erro no controle de potência seria P_V . Atribuindo um valor a P_V , temos que achar o melhor valor para P_D , potência de um usuário de dados que chegaria à ERB. Como estamos desprezando o ruído térmico, estamos especialmente interessados na relação P_D/P_V . Para atender aos usuários de dados com maior taxa de bits, precisamos de uma potência mais alta chegando na ERB, de forma a compensar o

decréscimo no ganho de processamento, que é inversamente proporcional à taxa de bits. Conforme mostrado na equação (1.2).

Como os sistemas CDMA são limitados por interferência, não podemos aumentar a potência dos usuários de dados indefinidamente, pois prejudicaria a QoS dos usuários de voz devido a um acréscimo na interferência. Precisamos, então, calcular a potência que pode ser atribuída aos usuários de dados de forma que a OP seja mantida aceitável. Para tal precisamos das FDPs do sinal desejado e do sinal interferente.

2.2 Formulação Matemática

2.2.1 Cálculo das FDPs da interferência e do sinal desejado

A interferência em um usuário de voz pode ser modelada por

$$I_V = P_V \sum_{i=2}^{n_V} \eta_i z_i + P_D \sum_{i=n_V+1}^{n_V+n_D} z_i \quad (2.1)$$

onde n_V e n_D são o número de usuários de voz e dados respectivamente, η_i são variáveis aleatórias (VAs) podendo assumir valores 0 ou 1 com $P\{\eta_i = 1\} = \lambda$, modelando a atividade de voz, λ é o fator de atividade de voz, z_i são VAs log-normais com média logaritmica zero e desvio padrão σ_{zdB} , modelando a imperfeição no controle de potência. Poderemos também chamar o desvio padrão no controle de potência de σ_{cp} , como faremos mais adiante e nos demais capítulos.

Podemos aproximar uma soma de k VAs z_i log-normais identicamente distribuídas e independentes por uma VA Ψ_k log-normal [6], com média igual à soma das médias e variância igual à soma das variâncias, isto é, $\overline{\Psi_k} = k\bar{z}$ e $\sigma_{\Psi_k}^2 = k\sigma_z^2$, onde $\bar{z}$ e σ_z^2 são a média linear e a variância linear de cada VA z_i , respectivamente, dadas por [7]

$$\bar{z} = \exp\left(\frac{(\ln 10)^2 \sigma_{zdB}^2}{200}\right)$$

$$\sigma_z^2 = \exp\left(\frac{(\ln 10)^2 \sigma_{zdB}^2}{50}\right) - \exp\left(\frac{(\ln 10)^2 \sigma_{zdB}^2}{100}\right)$$

A seguir calcularemos a FDP do primeiro termo de (2.1), a qual denotaremos por $p_{I_{V_1}}(x)$.

Sendo $A_i = \eta_i z_i$:

$$\begin{aligned} p_{A_i}(x)dx &= P\{A_i = x\} \\ P\{A_i = x\} &= P\{z_i = x \mid \eta_i = 1\}P\{\eta_i = 1\} = p_{z_i}(x)dx\lambda, \text{ para } x \neq 0 \end{aligned}$$

logo

$$p_{A_i}(x) = \lambda p_{z_i}(x), \text{ para } x \neq 0$$

e

$$P\{A_i = 0\} = P\{\eta_i = 0\} = 1 - \lambda$$

então a FDP de A_i será

$$p_{A_i}(x) = \lambda p_{z_i}(x) + (1 - \lambda)\delta(x)$$

onde $\delta(x)$ é a função delta de Dirac.

A FDP de $B = A_1 + A_2$ é a convolução de duas FDPs A_i

$$\begin{aligned} p_B(x) &= p_{A_1}(x) * p_{A_2}(x) \\ &= [\lambda p_{z_1}(x) + (1 - \lambda)\delta(x)] * [\lambda p_{z_2}(x) + (1 - \lambda)\delta(x)] \\ &= \lambda^2 p_{z_1}(x) * p_{z_2}(x) + (1 - \lambda)\lambda p_{z_2}(x) + \lambda(1 - \lambda)p_{z_1}(x) + (1 - \lambda)^2\delta(x) \end{aligned}$$

logo,

$$p_B(x) = \lambda^2 p_{\Psi_2}(x) + 2\lambda(1 - \lambda)p_{\Psi_1}(x) + (1 - \lambda)^2\delta(x)$$

Podemos observar que o primeiro termo resulta de quando ambos os usuários estão ativos, λ^2 é esta probabilidade e $p_{\Psi_2}(x)$ é a FDP da soma de duas VAs z_i . O segundo termo resulta quando apenas um dos dois usuários está em atividade de voz, $2\lambda(1 - \lambda)$ é esta probabilidade e $p_{\Psi_1}(x)$ é a FDP de uma VA z_i . O terceiro termo resulta quando nenhum dos usuários está em atividade de voz, $(1 - \lambda)^2$ é esta probabilidade e a FDP é um impulso na origem. Podemos estender este raciocínio para uma soma com mais termos, portanto para calcular a FDP do primeiro termo de (2.1) precisamos apenas somar as FDPs $p_{\Psi_k}(x)$ ponderada pela probabilidade de k dos $n_V - 1$ usuários estarem ativos. Ou seja,

$$\text{Prob}\{k \text{ usuários ativos}\} = \binom{n_V - 1}{k} \lambda^k (1 - \lambda)$$

Desse modo como P_V é uma constante multiplicativa,

$$p_{I_{V_1}}(x) = \frac{(1 - \lambda)^{n_V - 1}}{P_V} \delta\left(\frac{x}{P_V}\right) + \sum_{k=1}^{n_V - 1} \text{Prob}\{k \text{ usuários ativos}\} \frac{1}{P_V} p_{\Psi_k}\left(\frac{x}{P_V}\right)$$

logo,

$$p_{I_{V_1}}(x) = \frac{(1 - \lambda)^{n_V - 1}}{P_V} \delta\left(\frac{x}{P_V}\right) + \frac{1}{P_V} \sum_{k=1}^{n_V - 1} \binom{n_V - 1}{k} \lambda^k (1 - \lambda)^{n_V - 1 - k} p_{\Psi_k}\left(\frac{x}{P_V}\right) \quad (2.2)$$

Para testar a expressão (2.2) simulamos o primeiro termo de (2.1) para $n_V = 6$. Na Fig. 2.1 comparamos seu histograma com a FDP da expressão (2.2). Podemos observar que a FDP calculada é bem próxima a do histograma.

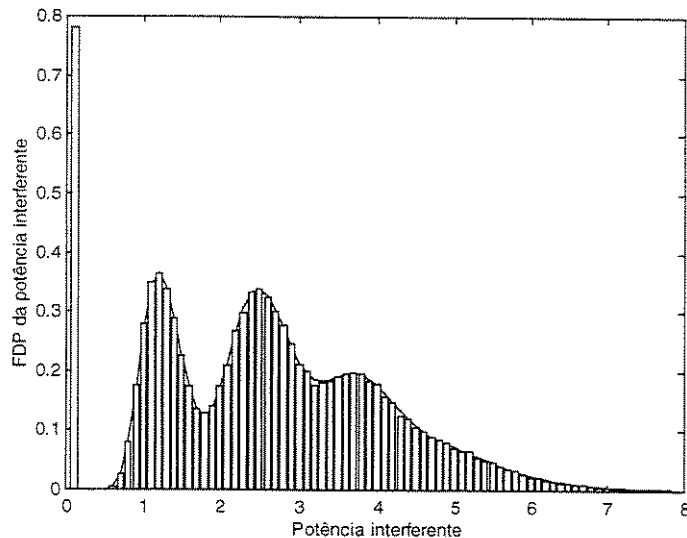


Figura 2.1: Comparação da FDP calculada com o histograma, para $n_V = 6$ e $\lambda = 0,4$.

Calculamos a FDP do segundo termo de (2.1) como em [6]. Ela tem distribuição log-normal e é dada por

$$p_{I_{V_2}}(x) = \frac{1}{P_D} p_{\Psi_{n_D}}\left(\frac{x}{P_D}\right) \quad (2.3)$$

A FDP da interferência total é a convolução de $p_{I_{V_1}}(x)$ com $p_{I_{V_2}}(x)$. Trocando a ordem da convolução com o somatório chegamos na expressão

$$p_{I_V}(x) = (1 - \lambda)^{n_V - 1} p_{I_{V_2}}(x) + \sum_{k=1}^{n_V - 1} \binom{n_V - 1}{k} \lambda^k (1 - \lambda)^{n_V - 1 - k} \left(p_{I_{V_2}}(x) * \frac{p_{\Psi_k}(x/P_V)}{P_V} \right) \quad (2.4)$$

A primeira FDP da convolução é log-normal com média $n_D P_D \bar{z}$ e variância $n_D P_D^2 \sigma_z^2$, a segunda FDP é também log-normal com média $k P_V \bar{z}$ e variância $k P_V^2 \sigma_z^2$. Como uma convolução de FDPs equivale à soma de VAs, aproximaremos esta nova VA dentro do somatório por uma log-normal C_k com média igual à soma das médias e variância igual à soma das variâncias. A média e a variância são dadas, respectivamente, por

$$\overline{C_k} = (k P_V + n_D P_D) \bar{z}$$

$$\sigma_{C_k}^2 = (k P_V^2 + n_D P_D^2) \sigma_z^2$$

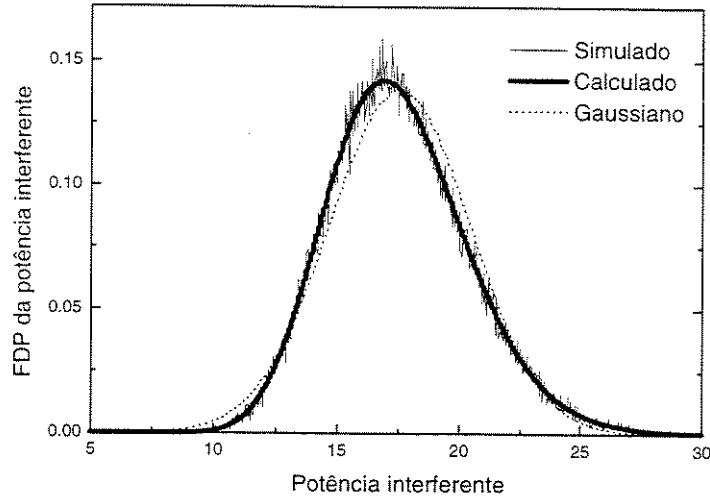


Figura 2.2: Comparação da FDP simulada com a calculada e a aproximação Gaussiana. Para : $n_V = 2$, $n_D = 2$.

Temos então

$$p_{I_V}(x) = (1 - \lambda)^{n_V-1} p_{I_{V_2}}(x) + \sum_{k=1}^{n_V-1} \binom{n_V-1}{k} \lambda^k (1 - \lambda)^{n_V-1-k} p_{C_k}(x) \quad (2.5)$$

A Fig. 2.2 nos mostra que a FDP de (2.5) é muito próxima a uma Gaussiana com mesma média e variância. Comparamos a FDP calculada e a Gaussiana com a simulada, para $n_V = 2$ e $n_D = 2$. Pelo gráfico observamos que a FDP simulada oscila em torno da FDP de (2.5) e a Gaussiana é bastante próxima a estas duas. O exemplo do gráfico, com poucos usuários, é um caso crítico para a aproximação Gaussiana. Mostramos assim, que a aproximação é boa inclusive para este caso. Para efeito de comparação calcularemos a probabilidade de perda de desempenho usando (2.5) e também a aproximação Gaussiana.

A partir de (2.1) podemos calcular a média e a variância da interferência em um usuário de voz :

$$\overline{I_V} = [(n_V - 1)\lambda P_V + n_D P_D] \overline{z} \quad (2.6)$$

$$\sigma_{I_V}^2 = (n_V - 1)\lambda P_V^2 (\overline{z^2} - \lambda \overline{z}^2) + n_D \sigma_z^2 P_D^2 \quad (2.7)$$

Quanto à potência do sinal de voz desejado que chega à ERB, esta pode ser modelado por $S = P_V z$, onde z é uma VA log-normal representando o erro no controle de potência. A FDP de S é dada por

$$P_s(x) = \frac{1}{P_V} p_z\left(\frac{x}{P_V}\right) \quad (2.8)$$

2.2.2 Cálculo da probabilidade de perda de desempenho

Usuários de voz

Neste ponto conhecemos a estatística da interferência e do sinal desejado, que por sua vez são funções de P_V e P_D . Uma vez escolhido P_V temos que encontrar valores máximos para P_D , respeitando a restrição da OP dos usuários de voz. A relação sinal ruído de um usuário de voz é dada por

$$\gamma_V = \frac{W P_V z}{r_V I_V} \quad (2.9)$$

onde W é a banda do sinal espalhado, r_V é a taxa de transmissão dos usuários de voz e z é o erro no controle de potência.

Queremos obter a probabilidade de perda de desempenho, $\text{Prob}\{\gamma_V < \gamma_{V \min}\}$. Como z é uma VA log-normal, a OP pode ser expressa por

$$\text{Prob}\{\gamma_V < \gamma_{V \min}\} = \text{Prob}\left\{z < \frac{\gamma_{V \min} r_V I_V}{W P_V}\right\}$$

Como z é log-normal, então $z = 10^{\varepsilon/10}$, com $\sigma_\varepsilon = \sigma_{zdB}$, isto é, o desvio padrão de z em dB é igual ao desvio padrão da VA Gaussiana ε [7]. Obtemos que

$$\text{Prob}\left\{z < \frac{\gamma_{V \min} r_V I_V}{W P_V}\right\} = \text{Prob}\left\{\varepsilon < 10 \log \frac{\gamma_{V \min} r_V I_V}{W P_V}\right\} = \frac{1}{2} \left(1 + \text{Erf}\left(\frac{10 \log \frac{\gamma_{V \min} r_V I_V}{W P_V}}{\sqrt{2} \sigma_\varepsilon}\right)\right)$$

descondicionando em relação a I_V temos

$$P\{\text{perda de desempenho}\} = \frac{1}{2} \int_0^\infty \left(1 + \text{Erf}\left(\frac{10 \log \frac{\gamma_{V \min} r_V x}{W P_V}}{\sqrt{2} \sigma_\varepsilon}\right)\right) p_{I_V}(x) dx \quad (2.10)$$

onde $\text{Erf}(x)$ é a função erro, dada por

$$\text{Erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

Usando a aproximação Gaussiana para (2.5) a OP depende apenas da média e da variância de I_V , que por sua vez depende apenas de P_D , pois os outros parâmetros estão fixos.

Para um número fixo de usuários de voz e de dados, devemos calcular os valores de $\overline{I_V}$ e σ_{I_V} , tal que a OP seja atingida. Fixaremos a média da interferência a que chamaremos

de $\bar{I}_{fix}$. Para diferentes valores de n_V e n_D propomos manter a média da interferência (2.6) constante. Não podemos manter a variância constante também, pois não podemos atender (2.6) e (2.7) simultaneamente. Observamos que ao aumentar o número de usuários de voz, a variância da interferência aumenta, resultando em um aumento da probabilidade de perda de desempenho. Resolvemos, então, utilizar um parâmetro ψ para reduzir P_D à medida que n_V aumenta. Para manter a média da interferência constante $\psi = 1$, como queremos diminuir um pouco esta média podemos usar $\psi = 1,02$, que resultará em uma pequena diminuição na média da interferência para compensar o aumento da variância. Não conseguimos manter exatamente a mesma OP para diferentes números de usuários no sistema, contudo a variação ficou entre $0,5 \times 10^{-2}$ e $1,0 \times 10^{-2}$, que achamos aceitável para um objetivo de 10^{-2} . Para tal propomos a seguinte expressão para P_D obtida a partir de (2.6)

$$P_D = \frac{\bar{I}_{fix} - (n_V - 1)^\psi \lambda P_V \bar{z}}{n_D \bar{z}} \quad (2.11)$$

Este resultado mostra que a potência dos usuários de dados é inversamente proporcional ao número deste usuários e decresce à medida que aumenta o número de usuários de voz no sistema, pois os usuários de dados usarão a potência não utilizada pelos usuários de voz.

Usuários de dados

Para calcular a OP dos usuários de dados, partimos de uma expressão muito parecida com (2.1)

$$I_D = P_V \sum_{i=1}^{n_V} \eta_i z_i + P_D \sum_{i=n_V+2}^{n_V+n_D} z_i \quad (2.12)$$

Para os usuários de dados podemos obter uma expressão análoga a (2.10), dada por

$$P\{\text{perda de desempenho}\} = \frac{1}{2} \int_0^\infty \left(1 + \text{Erf} \left(\frac{10 \log \frac{\gamma_{D \min} r_D x}{W P_D}}{\sqrt{2} \sigma_\epsilon} \right) \right) p_{I_D}(x) dx \quad (2.13)$$

Para calcular r_D , a taxa de bits dos usuários de dados, buscando a mesma OP, usaremos o critério

$$\frac{\overline{\gamma_V}}{\gamma_{V \min}} = \frac{\overline{\gamma_D}}{\gamma_{D \min}} \quad (2.14)$$

Como γ_V e γ_D são quocientes de VAs, vide 2.9 não conseguimos expressões fechadas para suas médias, usamos, então, a seguinte aproximação para (2.14)

$$\frac{WP_V\bar{z}}{r_V\bar{I}_V\gamma_{V\min}} = \frac{WP_D\bar{z}}{r_D\bar{I}_D\gamma_{D\min}}$$

onde $\bar{I}_D$ é a média da interferência em um usuário de dados, implicando que a taxa de transmissão de bits dos usuários de dados é dada por

$$r_D = \left(r_V \frac{\gamma_{V\min} P_D}{\gamma_{D\min} P_V} \right) \frac{(n_V - 1)\lambda P_V + n_D P_D}{n_V \lambda P_V + (n_D - 1)P_D} \quad (2.15)$$

A segunda fração foi incluída para manter a mesma interferência para um usuário de dados ou de voz, quando temos muitos usuários no sistema ela é muito próxima à unidade e poderá ser desprezada. Quando deseja-se a mesma relação sinal ruído mínima tanto para dados e voz cancelamos $\gamma_{V\min}$ com $\gamma_{D\min}$. Na maioria dos casos podemos fazer $r_D = r_V P_D / P_V$. Observamos que a taxa dos usuários de dados tende a ser proporcional à potência destes, como mostrado na Fig. 2.4.

2.3 Resultados numéricos

A Fig. 2.3 mostra a OP em função do número de usuários de dados. Foi feita simulação pelo método de Monte Carlo. Comparamos com o resultado fornecido por (2.10), utilizando a FDP dada por (2.5) e a aproximação Gaussiana de (2.5). Usamos os seguintes parâmetros : $\gamma_{V\min} = \gamma_{D\min} = 7$ dB, $\lambda = 0,4$, $r_V = 9600$ bits/s, $W = 1,25$ MHz, $\sigma_{cp} = 1$ dB e $\psi = 1,02$. Observamos que (2.10) acompanha o resultado obtido pela simulação. Usando (2.5) temos uma curva ligeiramente mais próxima à simulação que usando a FDP Gaussiana. Contudo, a aproximação Gaussiana apresenta uma boa precisão, pois temos aproximações inerentes à modelagem. Usando os mesmos parâmetros da Fig. 2.3 traçamos as curvas da taxa de transmissão r_D e da relação de potência P_D/P_V na Fig. 2.4. Na Fig. 2.5, mantendo os mesmos parâmetros, traçamos a probabilidade de perda de desempenho como função de n_V para usuários de voz e de dados, usando (2.10) e (2.13), respectivamente. Traçamos a curva para $n_D = 6$ e também para $n_D = 15$.

Neste capítulo estudamos o comportamento de um sistema multimídia CDMA, para atender a usuários de voz e dados. Propusemos uma expressão para a FDP do sinal interferente e mostramos que ela pode ser aproximada por uma Gaussiana. Através da análise da OP propusemos valores de potência e de taxa de transmissão de bits de usuários de dados, em função do número de usuários no sistema, visando maximizar a taxa de transmissão dos usuários de dados, mantendo a OP abaixo de 1%.

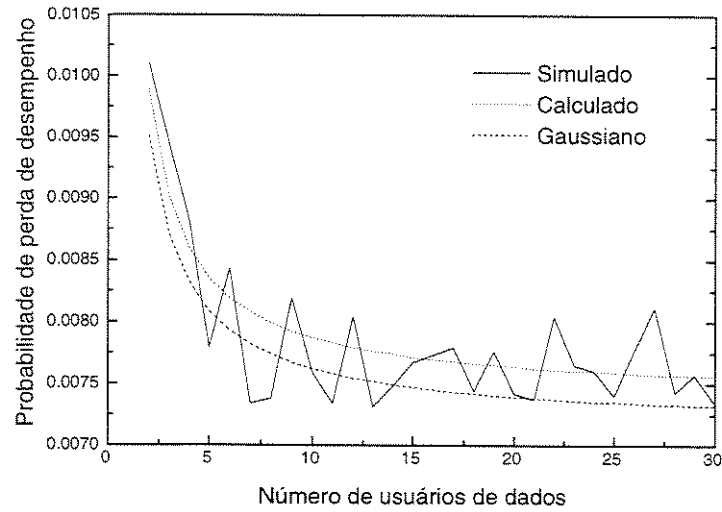


Figura 2.3: Probabilidade de perda de desempenho. Para : $\gamma_{\min V} = \gamma_{\min D} = 7$ dB, $\lambda = 0,4$, $r_V = 9600$ bits/s, $W = 1,25$ MHz e $\sigma_{cp} = 1$ dB, $n_V = 15$, $\psi = 1,02$.

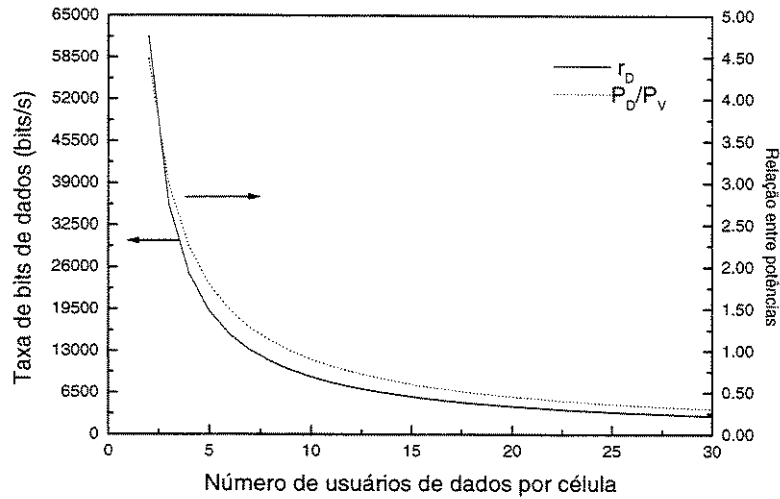


Figura 2.4: Taxa de bits dos usuários de dados r_D e a relação de potência P_D/P_V . Para : $\gamma_{\min V} = \gamma_{\min D} = 7$ dB, $\lambda = 0,4$, $r_V = 9600$ bits/s, $W = 1,25$ MHz e $\sigma_{cp} = 1$ dB, $n_V = 12$, $\psi = 1,02$.

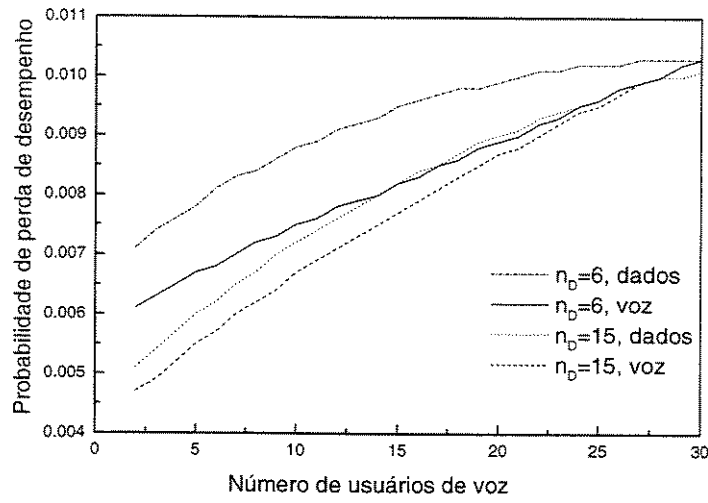


Figura 2.5: Probabilidade de perda de desempenho para usuários de voz e dados, parametrizado para $n_D = 6$ e $n_D = 15$. $\gamma_{\min V} = \gamma_{\min D} = 7$ dB, $\lambda = 0,4$, $r_V = 9600$ bits/s, $W = 1,25$ MHz e $\sigma_{cp} = 1$ dB, $\psi = 1,02$.

Capítulo 3

Interferência numa ERB em um sistema CDMA somente para voz

Neste capítulo iremos calcular a estatística da interferência que chega na ERB gerada pelos usuários móveis de voz, localizados na célula que contém a ERB, e no restante do sistema. Consideramos um sistema de ERBs espalhadas segundo uma disposição hexagonal, que se repete por todo um plano infinito. Usaremos perda de propagação proporcional à distância na quarta potência, contudo desenvolvemos as equações para qualquer expoente β de perda de percurso. Percebemos que, para $\beta = 4$ a interferência gerada pelas células da quinta camada em diante é muito pequena e pode ser desprezada. Calcularemos até a sexta camada.

Consideramos que um móvel pode comunicar-se com as 9 ERBs mais próximas, escolhendo a que tiver menor atenuação. Estamos considerando sombreamento modelado por uma log-normal e, portanto, nem sempre a célula mais próxima oferece a menor atenuação. Na literatura existe certa discordância em relação ao valor da interferência externa [1], [2], [3], [4], então resolvemos desenvolver nosso próprio método de cálculo, pois poderemos comparar com os resultados existentes. Primeiro faremos os cálculos para um sistema CDMA somente com usuários de voz e sem monitorização da atividade de voz, depois consideraremos monitorização de atividade de voz. No próximo capítulo adaptaremos os resultados para um sistema multimídia.

Como os usuários podem comunicar-se com qualquer uma das 9 estações rádio base mais próximas, não podemos demarcar o espaço de acordo com a ERB com a qual o usuário está comunicando. Contudo, dividiremos o espaço em hexágonos que chamaremos de células, lembramos que o usuário posicionado numa célula não estará necessariamente conectado à ERB localizada em seu centro. Ele poderá estar conectado a qualquer uma das 9 ERBs mais próximas. Numeraremos as ERBs conforme a Fig. 3.1. Podemos observar que todos os usuários situados na área hachurada têm como as 9 ERBs mais próximas as numeradas de 1 à 9. Tomaremos a ERB central, a que chamaremos de ERB C, como a ERB a que calcularemos a interferência proveniente de todos os usuários do sistema. Na Fig.3.1 a ERB C é a de número 9. As células 7 e 8 são necessárias, pois é suposto que o móvel se situa na

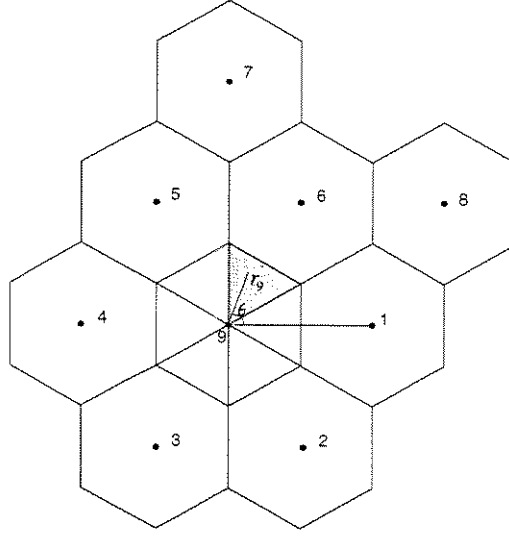


Figura 3.1: As nove ERBs mais próximas de um móvel situado na região hachurada.

região hachurada.

Toda região do sistema onde haja concentração de usuários móveis gera interferência na ERB C. Observamos que a interferência gerada numa região é independente da gerada em qualquer outra, logo a interferência total na ERB central é uma soma de variáveis aleatórias independentes. Podemos, então, calcular a esperança e variância da interferência gerada em cada região e somar as esperanças e variâncias de todas as regiões. Conforme [8], a esperança da soma de VAs é a soma das esperanças de cada VA. Esta propriedade da soma também é válida para a variância de VAs independentes.

Assumimos que os usuários estão uniformemente distribuídos nas regiões triangulares. Cada canal de comunicação com uma ERB sofre sombreamento que pode ser modelado por uma VA de distribuição log-normal, gerada a partir de uma Gaussiana em dB . Consideraremos, também, perda de percurso em relação à ERB_{*i*} exponencial, r_i^β , onde r_i é a distancia do móvel à ERB_{*i*}. A atenuação do canal Móvel-ERB_{*i*}, é então :

$$\alpha_i = r_i^\beta 10^{\frac{\varepsilon_i}{10}}$$

onde ε_i é variável aleatória de FDP Gaussiana em dB , com média nula e desvio padrão σ_s . Usamos ε_i para gerar uma variável de distribuição log normal $10^{\frac{\varepsilon_i}{10}}$ que modela o sombreamento à ERB_{*i*}, onde esta nova variável tem desvio padrão em dB igual a σ_s [7].

Se o controle de potência fosse ideal, a potência que chegaria à ERB_{*x*} com a qual o móvel esta conectado seria P_V . Para que chegue P_V à ERB_{*x*} é necessário que o móvel transmita potência :

$$P_t = P_V r_x^\beta 10^{\frac{\varepsilon_x}{10}} = P_V \alpha_x$$

onde r_x é a distância do móvel à ERB _{x} , desta forma, a potência que chegaria à ERB _{x} com controle ideal de potência seria :

$$P_t/\alpha_x = P_V\alpha_x/\alpha_x = P_V$$

Como tem-se erro no controle de potência, o qual pode ser modelado por uma log-normal z_{cp} , chega à ERB _{x} $P_V z_{cp}$.

Como cada móvel comunica-se com uma das 9 ERBs mais próximas, na verdade, com a que tiver menor atenuação, a potência transmitida pelo móvel será

$$P_t = P_V \min(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8, \alpha_9) \quad (3.1)$$

3.1 Interferência originada nas regiões em que o móvel comunica com a ERB C

3.1.1 Interferência originada na célula central

Primeiro calcularemos a interferência que chega à ERB 9 proveniente de um móvel situado num ponto (r_9, θ) dado, localizado na região hachurada da Fig. 3.1. Usaremos um sistema de coordenadas polares (r_9, θ) , com origem na ERB 9, e ângulo θ medido a partir do eixo horizontal no sentido anti-horário, conforme indicado na Fig. 3.1. Por geometria podemos escrever r_i , $i = 1...8$, como função de r_9 e θ , onde R é o raio da circunferência inscrita no hexágono, portanto a distância entre duas ERBs adjacentes é $2R$. Temos a seguir

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{4R^2 + r_9^2 - 4Rr_9 \cos \theta} \\ r_2 &= \sqrt{4R^2 + r_9^2 - 4Rr_9 \cos (\theta + \pi/3)} \\ r_3 &= \sqrt{4R^2 + r_9^2 - 4Rr_9 \cos (\theta + 2\pi/3)} \\ r_4 &= \sqrt{4R^2 + r_9^2 - 4Rr_9 \cos (\pi - \theta)} \\ r_5 &= \sqrt{4R^2 + r_9^2 - 4Rr_9 \cos (2\pi/3 - \theta)} \\ r_6 &= \sqrt{4R^2 + r_9^2 - 4Rr_9 \cos (\pi/3 - \theta)} \\ r_7 &= \sqrt{12R^2 + r_9^2 - 4R\sqrt{3}r_9 \cos (\theta - \pi/6)} \\ r_8 &= \sqrt{12R^2 + r_9^2 - 4R\sqrt{3}r_9 \cos (\pi/2 - \theta)} \end{aligned} \quad (3.2)$$

A potência interferente que chega em 9, gerada por um usuário em um ponto dado na região hachurada da Fig. 3.1, é

$$I_u = \frac{1}{\alpha_9} P_t \quad (3.3)$$

Como a interferência é aleatória, queremos calcular sua esperança e variância. Substituindo (3.1) em (3.3) temos que

$$E\{I_u\} = E\left\{\frac{P_V}{\alpha_9} \min(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8, \alpha_9)\right\}$$

Um mínimo de VA contínuas são eventos mutuamente exclusivos, pois a probabilidade de 2 variáveis serem simultaneamente mínimas é nula. Podemos, então, subdividir esta esperança numa soma de esperanças de eventos mutuamente exclusivos. Logo,

$$E\left\{\frac{P_V}{\alpha_9} \min(\alpha_i)\right\}_{i=1\dots 9} = \sum_{i=1}^9 E\left\{\frac{P_V}{\alpha_9} \alpha_i \mid \alpha_i < \alpha_j, \forall j, j \neq i\right\} \text{Prob}\{\alpha_i < \alpha_j\}_{\forall j, j \neq i} \quad (3.4)$$

onde cada termo do somatório é referente a quando um α_i for menor que todos os demais.

O primeiro termo do somatório corresponde ao caso em que α_1 for menor que os demais, quando o móvel estar-se-á comunicando com a ERB 1, e a potência interferente na ERB 9 será $P_V \alpha_1 / \alpha_9$

$$\frac{P_V}{\alpha_9} \alpha_1 = \frac{P_V 10^{-\varepsilon_9/10}}{r_9^\beta} r_1^\beta 10^{\varepsilon_1/10}$$

Se $\alpha_1 < \alpha_9$, então

$$r_1^\beta 10^{\varepsilon_1/10} < r_9^\beta 10^{\varepsilon_9/10}$$

logo,

$$\varepsilon_9 > \varepsilon_1 + 10\beta \log(r_1/r_9) \quad (3.5)$$

é condição necessária e suficiente para que $\alpha_1 < \alpha_9$ e a usaremos como limitante inferior na integral da função densidade de probabilidade de ε_9 , pois se $\alpha_1 < \alpha_9$, então quando $\varepsilon_9 < \varepsilon_1 + 10\beta \log(r_1/r_9)$, a FDP $p_{\varepsilon_9}(\varepsilon_9) = 0$. Logo,

$$E\left\{\frac{P_V}{\alpha_9} \alpha_1\right\} = P_V \left(\frac{r_1}{r_9}\right)^\beta \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\varepsilon_1/10} \int_{\varepsilon_1 + 10\beta \log(r_1/r_9)}^{\infty} 10^{-\varepsilon_9/10} p_{\varepsilon_9}(\varepsilon_9) d\varepsilon_9 p_{\varepsilon_1}(\varepsilon_1) d\varepsilon_1 \quad (3.6)$$

Faltando considerar que α_1 é menor que os demais α_i e não apenas α_9 , portanto falta multiplicar o integrando pela probabilidade de α_1 ser menor que os demais α_i .

Como os α_i são independentes entre si, esta probabilidade é o produto das probabilidades, $\prod_{i=2}^8 \text{Prob}\{\alpha_1 < \alpha_i\}$.

3.1. INTERFERÊNCIA ORIGINADA NAS REGIÕES EM QUE O MÓVEL COMUNICA COM A ERB C21

Usando um limite inferior na integral da função densidade de probabilidade análoga à (3.5), temos que a probabilidade de $\alpha_1 < \alpha_i$ é

$$\text{Prob}\{\alpha_1 < \alpha_i\} = \text{Prob}\{\varepsilon_i > \varepsilon_1 + 10\beta \log(r_1/r_i)\} =$$

$$\int_{\varepsilon_1 + 10\beta \log(r_1/r_i)}^{\infty} p_{\varepsilon_i}(\varepsilon_i) d\varepsilon_i = \frac{1}{2} \left[1 - \text{erf} \left(\frac{\varepsilon_1 + 10\beta \log(r_1/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right]$$

Logo, a probabilidade de α_1 ser menor que todos os demais α_i , até α_8 é

$$\text{Prob}\{\alpha_1 \text{ menor todos } \alpha_i, i = 2 \dots 8\} = \prod_{i=2}^8 \frac{1}{2} \left[1 - \text{erf} \left(\frac{\varepsilon_1 + 10\beta \log(r_1/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] \quad (3.7)$$

Multiplicando o integrando de (3.6) por (3.7) temos o primeiro termo de (3.4)

$$\begin{aligned} E \left\{ \frac{P_V}{\alpha_9} \alpha_1 \right\} \text{Prob}\{\alpha_1 < \alpha_j\}_{\forall j, j \neq 1} &= P_V \left(\frac{r_1}{r_9} \right)^\beta \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\varepsilon_1/10} \int_{\varepsilon_1 + 10\beta \log(r_1/r_9)}^{\infty} 10^{-\varepsilon_9/10} p_{\varepsilon_9}(\varepsilon_9) d\varepsilon_9 \\ &\quad \times \prod_{i=2}^8 \frac{1}{2} \left[1 - \text{erf} \left(\frac{\varepsilon_1 + 10\beta \log(r_1/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_1}(\varepsilon_1) d\varepsilon_1 \end{aligned}$$

Os próximos sete termos, de $i = 2$ até $i = 8$ são análogos ao primeiro.

O nono termo ocorre quando o móvel esta comunicando-se com a ERB 9, a potência transmitida será $P_V \alpha_9$, e a recebida será

$$\frac{P_V \alpha_9}{\alpha_9} z_{cp} = P_V z_{cp} \quad (3.8)$$

onde z_{cp} representa o erro no controle de potência, cuja média é $\overline{z_{cp}}$. Esta variável tem também distribuição log-normal como o sombreamento, contudo seu desvio padrão, σ_{cp} , é bem menor. Geralmente de apenas 1 dB, enquanto o sombreamento tem desvio da ordem de 8 dB. Temos de multiplicar (3.8) pela probabilidade de α_9 ser menor que os demais α_i , analogamente a (3.7) temos

$$\text{Prob}\{\alpha_9 \text{ menor todos } \alpha_i\} = \prod_{i=1}^8 \frac{1}{2} \left[1 - \text{erf} \left(\frac{\varepsilon_9 + 10\beta \log(r_9/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] \quad (3.9)$$

Logo, o nono termo é

$$P_V \overline{z_{cp}} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^8 \frac{1}{2} \left[1 - \text{erf} \left(\frac{\varepsilon_9 + 10\beta \log(r_9/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_9}(\varepsilon_9) d\varepsilon_9 \quad (3.10)$$

A esperança da interferência em 9 causada por um usuário localizado em um ponto dado, (r_9, θ) na área hachurada é então :

$$\begin{aligned}
E\{I_u\} = & P_V \sum_{n=1}^8 \left(\frac{r_n}{r_9}\right)^\beta \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\varepsilon_n/10} \int_{\varepsilon_n + 10\beta \log(r_n/r_9)}^{\infty} 10^{-\varepsilon_9/10} p_{\varepsilon_9}(\varepsilon_9) d\varepsilon_9 \\
& \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^8 \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\varepsilon_n + 10\beta \log(r_n/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_n}(\varepsilon_n) d\varepsilon_n \\
& + P_V \overline{z_{cp}} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^8 \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\varepsilon_9 + 10\beta \log(r_9/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_9}(\varepsilon_9) d\varepsilon_9 \quad (3.11)
\end{aligned}$$

Como os usuários são móveis e variam sua posição, temos que calcular a esperança da interferência gerada na região hachurada da Fig. 3.1, considerando que os usuários estão uniformemente distribuídos nesta região.

Devemos integrar na área a expressão (3.11) multiplicada pela FDP de um usuário na região $p_{\theta, r_9}(\theta, r_9)$, onde I será a potência interferente causada por um usuário uniformemente distribuído na região hachurada. Temos que

$$E\{I\} = \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{R}{\operatorname{sen}(\theta + \pi/6)}} E\{I_u\} p_{\theta, r_9}(\theta, r_9) dr_9 d\theta \quad (3.12)$$

onde o limite superior da integral interna no raio r_9 é a equação da aresta do hexágono

$$\frac{R}{\operatorname{sen}(\theta + \pi/6)}$$

Observamos que (3.12) representa a integral que expressa a esperança da interferência originada na região hachurada, considerando r_9 e θ como VAs que representam a posição de um usuário na região, cuja função densidade de probabilidade conjunta é

$$p_{\theta, r_9}(\theta, r_9) = \frac{r_9}{a}$$

onde $a = \sqrt{3}R^2/3$ é a área da região triangular hachurada à qual estamos integrando, esta FDP implica numa distribuição uniforme dos usuários. Pode-se, a princípio, achar estranho um usuário uniformemente distribuído numa região triangular. O que estamos fazendo é supor que o usuário pode estar em qualquer ponto da região triangular com igual probabilidade. Como estamos assumindo que as VA que representam as posições dos usuários são independentes entre si, calculamos a média e variância da interferência provocada por um usuário e depois multiplicaremos pelo número de usuários em cada região, para obter a média e variância da interferência originada por todos os usuários na região. Ao fazermos esta multiplicação, estamos fazendo a aproximação que cada região triangular tem um número constante de usuários uniformemente distribuídos, que é um pouco diferente de todos os

usuários estarem uniformemente distribuídos na célula. Estas premissas não afetam a média por ser esta uma operação linear, contudo podem surgir diferenças na variância. Temos, então, que multiplicar a integral (3.12) por $n_V/6$ para obter a média da interferência causada por todos os usuários da região triangular. Como há seis regiões simétricas ao redor da ERB central, também multiplicamos por 6, resultando num fator multiplicativo total de n_V .

Como $E\{I_u\}$ é uma soma de 9 termos e sabemos que a integral da soma é a soma das integrais, podemos escrever (3.12) como :

$$\begin{aligned}
 E\{I\} = & \frac{P_V}{a} \sum_{n=1}^8 \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{R}{\sin(\theta+\pi/6)}} \left(\frac{r_n}{r_9}\right)^\beta \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\varepsilon_n/10} \int_{\varepsilon_n+10\beta\log(r_n/r_9)}^{\infty} 10^{-\varepsilon_9/10} p_{\varepsilon_9}(\varepsilon_9) d\varepsilon_9 \\
 & \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^8 \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\varepsilon_n + 10\beta\log(r_n/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_n}(\varepsilon_n) d\varepsilon_n r_9 dr_9 d\theta \\
 & + \frac{P_V \overline{z_{cp}}}{a} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{R}{\sin(\theta+\pi/6)}} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^8 \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\varepsilon_9 + 10\beta\log(r_9/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_9}(\varepsilon_9) d\varepsilon_9 dr_9 d\theta \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

A equação (3.13) é a interferência média causada na ERB central, por um usuário uniformemente distribuído na região hachurada da Fig. 3.1. Iremos calcular o segundo momento desta interferência para podermos calcular a variância.

Para calcular o segundo momento basta quadrar I_u na integral de (3.13), resultando em

$$\begin{aligned}
 E\{I^2\} = & \frac{P_V^2}{a} \sum_{n=1}^8 \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{R}{\sin(\theta+\pi/6)}} \left(\frac{r_n}{r_9}\right)^{2\beta} \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\varepsilon_n/5} \int_{\varepsilon_n+10\beta\log(r_n/r_9)}^{\infty} 10^{-\varepsilon_9/5} p_{\varepsilon_9}(\varepsilon_9) d\varepsilon_9 \\
 & \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^8 \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\varepsilon_n + 10\beta\log(r_n/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_n}(\varepsilon_n) d\varepsilon_n r_9 dr_9 d\theta \\
 & + \frac{P_V^2 \overline{z_{cp}^2}}{a} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{R}{\sin(\theta+\pi/6)}} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^8 \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\varepsilon_9 + 10\beta\log(r_9/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_9}(\varepsilon_9) d\varepsilon_9 dr_9 d\theta \quad (3.14)
 \end{aligned}$$

Usando (3.13) e (3.14) e multiplicando o resultado por n_V , podemos calcular a variância da interferência na ERB central causada pelos n_V usuários situados na célula central. Assim, temos

$$\sigma^2 = n_V (E\{I^2\} - [E\{I\}]^2) \quad (3.15)$$

Resolvemos estas integrais numericamente usando $R = 1$.

Por curiosidade, vamos também calcular a probabilidade do móvel uniformemente distribuído na região hachurada da Fig. 3.1 estar conectado a cada uma das 9 ERBs mais

ERB	$E\{I\}$	$E\{I^2\}$	$\text{Prob}\{\alpha_n < \alpha_{i \neq n}\}$
1	0,0182	0,0104	5,44%
2	0,0040	0,0024	1,03%
3	0,0022	0,0014	0,55%
4	0,0040	0,0024	1,03%
5	0,0182	0,0104	5,44%
6	0,0472	0,0263	15,65%
7	0,0022	0,0013	0,57%
8	0,0022	0,0013	0,57%
9	0,7158	0,7751	69,71%

Tabela 3.1: Interferência causada na ERB C = ERB 9 por um usuário na região hachurada da Fig. 3.1 referente à ERB que estiver se comunicando, para $\beta = 4$, $\sigma_s = 8dB$ e $\sigma_{cp} = 1dB$

próximas. Usando (3.9) chegamos na seguinte expressão

$$\text{Prob}\{\alpha_n < \alpha_i\}_{\forall i, i \neq n} = \frac{1}{a} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{R}{\sin(\theta + \pi/6)}} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^9 \frac{1}{2} \left[1 - \text{erf} \left(\frac{\varepsilon_n + 10\beta \log(r_n/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_n}(\varepsilon_n) d\varepsilon_n r_9 dr_9 d\theta$$

Na tabela 3.1 calculamos os 9 termos de $E\{I\}$ e $E\{I^2\}$ e a probabilidade do móvel uniformemente distribuído na região comunicar-se com cada ERB. Cada termo é referente à interferência gerada na ERB C, quando o móvel estiver conectado a uma das 9 ERBs, lembramos que a ERB C na tabela é a de número 9. Numeramos os termos de um a 9, de acordo com a ERB a qual o móvel estiver se comunicando segundo a disposição da Fig. 3.1. Para gerar estes resultados usamos perda de propagação $\beta = 4$, desvio padrão do sombreamento de $\sigma_s = 8 \text{ dB}$, e desvio padrão do erro no controle de potência de $\sigma_{cp} = 1 \text{ dB}$. Observamos que os resultados numéricos da tabela são compatíveis com a disposição das ERBs da Fig. 3.1. ERBs simétricas em relação à área integrada, como as 1,5; 2,4; 7,8 apresentam os mesmos resultados. Assim, o móvel gera mais interferência quando está conectado às ERBs mais próximas pelo simples fato de ele permanecer mais tempo a elas conectado.

Na Tab. 3.1 observamos que para os parâmetros usados, sombreamento com desvio padrão de 8 dB e perda de percurso na quarta potência, $\beta = 4$, o móvel mantém-se conectado em 96,24% do tempo a somente quatro ERBs : 9, 6, 1, 5. Acreditamos que se ao invés do móvel escolher entre 9 ERBs escolhesse somente entre estas 4, a capacidade do sistema não seria muito afetada. O número de ERBs que o móvel deve escolher esta intimamente relacionado ao desvio padrão do sombreamento, e quanto maior este for, maior deverá ser o número de ERBs.

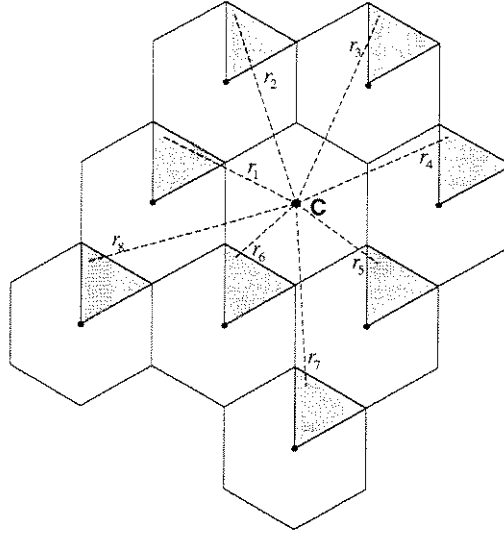


Figura 3.2: Regiões que usaremos para calcular a interferência gerada na ERB central.

3.1.2 Interferência originada nas demais regiões onde o móvel comunica-se com a ERB central

Agora vamos calcular a esperança e variância da interferência originada pelas regiões próximas ao hexágono central, mais precisamente nas demais regiões onde o móvel pode conectar-se com a ERB C, ressaltamos que estamos calculando a interferência que chega nesta ERB. Integraremos nas regiões hachuradas, e para cada integração, deslocaremos a origem do sistema de coordenadas polares. Na Fig. 3.2 as regiões hachuradas são as quais integramos : em cada integração a origem (ERB 9) será a ERB posicionada em um vértice do triângulo hachurado. Usaremos a mesma posição relativa entre as ERBs da Fig. 3.1, logo, a ERB C da Fig. 3.2 mudará de índice à medida que deslocamos a origem, a distância do móvel a esta ERB mudará de r_1 à r_8 conforme mostrado na Fig. 3.2. Usaremos esta técnica e a simetria da disposição das ERBs para calcular a interferência proveniente destas regiões. Deslocaremos a origem e manteremos os intervalos de integração, θ em $(\pi/6, \pi/2)$ e r_9 em $(0, R/\sin(\theta + \pi/6))$.

Primeiro calcularemos a interferência originada na região hachurada em que a distância do móvel à ERB C é r_1 . A diferença com o cálculo quando o móvel estava localizado na célula central, é que a distância do móvel à ERB C ao invés de ser r_9 passará a ser r_1 , e o sombreado será $10^{\varepsilon_1/10}$ ao invés de $10^{\varepsilon_9/10}$. Podemos, então, usar as equações (3.13) e (3.14) da seção passada com algumas pequenas modificações nos índices, trocamos todos os índices 9 por 1, exceto os índices referentes à integração em área, que continuam sendo r_9 e θ . Lembramos que em (3.2) escrevemos r_1 como função de r_9 .

$$\begin{aligned}
E_{r_1} \{I\} = & \frac{P_V}{a} \sum_{n=2}^9 \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{R}{\sin(\theta+\pi/6)}} \left(\frac{r_n}{r_1}\right)^\beta \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\varepsilon_n/10} \int_{\varepsilon_n+10\beta \log(r_n/r_1)}^{\infty} 10^{-\varepsilon_1/10} p_{\varepsilon_1}(\varepsilon_1) d\varepsilon_1 \\
& \times \prod_{\substack{i=2 \\ i \neq n}}^9 \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\varepsilon_n + 10\beta \log(r_n/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_n}(\varepsilon_n) d\varepsilon_n r_9 dr_9 d\theta \\
& + \frac{P_V \overline{z_{cp}}}{a} \int_0^{\frac{\pi}{3}} \int_0^{\frac{R}{\sin(\theta+\pi/6)}} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=2}^9 \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\varepsilon_1 + 10\beta \log(r_1/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_1}(\varepsilon_1) d\varepsilon_1 r_9 dr_9 d\theta
\end{aligned} \tag{3.16}$$

$$\begin{aligned}
E_{r_1} \{I^2\} = & \frac{P_V^2}{a} \sum_{n=2}^8 \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{R}{\sin(\theta+\pi/6)}} \left(\frac{r_n}{r_1}\right)^{2\beta} \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\varepsilon_n/5} \int_{\varepsilon_n+10\beta \log(r_n/r_1)}^{\infty} 10^{-\varepsilon_1/5} p_{\varepsilon_1}(\varepsilon_1) d\varepsilon_1 \\
& \times \prod_{\substack{i=2 \\ i \neq n}}^9 \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\varepsilon_n + 10\beta \log(r_n/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_n}(\varepsilon_n) d\varepsilon_n r_9 dr_9 d\theta \\
& + \frac{P_V^2 \overline{z_{cp}^2}}{a} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{R}{\sin(\theta+\pi/6)}} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=2}^9 \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\varepsilon_1 + 10\beta \log(r_1/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_1}(\varepsilon_1) d\varepsilon_1 r_9 dr_9 d\theta
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Temos, agora, que continuar a integração para todas as regiões hachuradas da Fig. 3.2. Para cada região a distância do móvel à ERB C muda de r_1 à r_8 , e o sombreado de $10^{\varepsilon_1/10}$ à $10^{\varepsilon_8/10}$. Logo, para qualquer uma das oito regiões hachuradas da Fig. 3.2 chamaremos a distância de um móvel nela localizado à ERB C, de r_g , $g = 1 \dots 8$. Para o primeiro e segundo momento da interferência originada nestas regiões, teremos, então, as expressões

$$\begin{aligned}
E_{r_g} \{I\} = & \frac{P_V}{a} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq g}}^9 \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{R}{\sin(\theta+\pi/6)}} \left(\frac{r_n}{r_g}\right)^\beta \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\varepsilon_n/10} \int_{\varepsilon_n+10\beta \log(r_n/r_g)}^{\infty} 10^{-\varepsilon_g/10} p_{\varepsilon_g}(\varepsilon_g) d\varepsilon_g \\
& \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n \\ i \neq g}}^9 \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\varepsilon_n + 10\beta \log(r_n/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_n}(\varepsilon_n) d\varepsilon_n r_9 dr_9 d\theta \\
& + \frac{P_V \overline{z_{cp}}}{a} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{R}{\sin(\theta+\pi/6)}} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq g}}^9 \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\varepsilon_g + 10\beta \log(r_g/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_g}(\varepsilon_g) d\varepsilon_g r_9 dr_9 d\theta
\end{aligned} \tag{3.18}$$

$$\begin{aligned}
 E_{r_g} \{I^2\} = & \frac{P_V^2}{a} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq g}}^8 \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{R}{\sin(\theta+\pi/6)}} \left(\frac{r_n}{r_g}\right)^{2\beta} \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\varepsilon_n/5} \int_{\varepsilon_n+10\beta \log(r_n/r_g)}^{\infty} 10^{-\varepsilon_g/5} p_{\varepsilon_g}(\varepsilon_g) d\varepsilon_g \\
 & \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n \\ i \neq g}}^9 \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\varepsilon_n + 10\beta \log(r_n/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_n}(\varepsilon_n) d\varepsilon_n r_g dr_g d\theta \\
 & + \frac{P_V^2 \overline{z_{cp}^2}}{a} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{R}{\sin(\theta+\pi/6)}} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq g}}^9 \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\varepsilon_g + 10\beta \log(r_g/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_g}(\varepsilon_g) d\varepsilon_g r_g dr_g d\theta \quad (3.19)
 \end{aligned}$$

Com as expressões genéricas (3.18) e (3.19) podemos calcular o primeiro e segundo momento da interferência gerada por região, onde a interferência gerada dentro do hexágono central já foi calculada. Além disto, podemos usar estas expressões genéricas, fazendo $g = 9$, para calcular a interferência gerada no hexágono central.

Portanto, temos que a variância da interferência gerada por um usuário uniformemente distribuído em cada uma destas regiões hachuradas da 3.2 é :

$$\sigma_{r_g}^2 = E_{r_g} \{I^2\} - [E_{r_g} \{I\}]^2$$

Como na subseção anterior, podemos observar que cada região hachurada da Fig. 3.2 tem outras 5 que geram interferência com mesma estatística devido à simetria hexagonal do sistema. Na Fig. 3.3 mostramos o conjunto das 6 regiões simétricas cujos móveis têm distância r_6 à ERB C, e portanto geram interferência com a mesma estatística.

Após integrarmos nas regiões hachuradas da Fig. 3.2 e multiplicarmos por $6 \times n_V/6$ as esperanças e variâncias, teremos a estatística da interferência gerada na área hachurada da Fig. 3.4.

Temos, então, a esperança e a variância da potência interferente gerada na região hachurada e no hexágono central da Fig.3.4. Esta região corresponde a toda a região onde o móvel pode se comunicar com a ERB C. Fora desta região, a ERB C não será uma das 9 mais próximas. Usando (3.18) e (3.19), já podemos calcular a esperança e variância da interferência originada nas regiões onde o móvel pode se comunicar com a ERB central, a que chamaremos de interferência interna, I_{int} .

$$E \{I_{int}\} = n_V \sum_{g=1}^9 E_{r_g} \{I\} \quad (3.20)$$

$$\sigma_{I_{int}}^2 = n_V \sum_{g=1}^9 \left(E_{r_g} \{I^2\} - E_{r_g}^2 \{I\} \right) \quad (3.21)$$

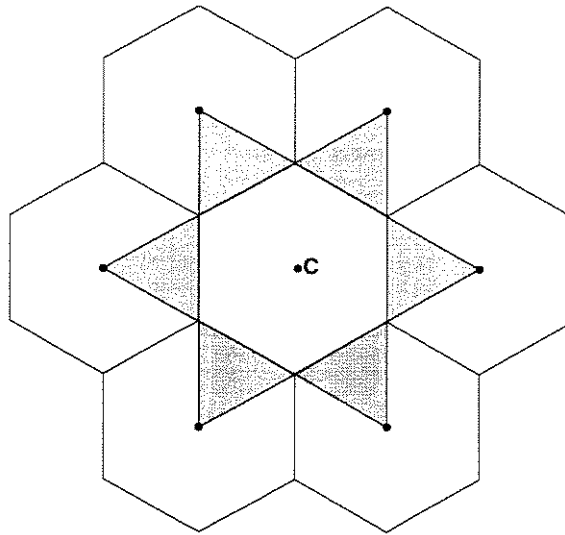


Figura 3.3: O conjunto das seis regiões simétricas cuja distância de um ponto à ERB C vale r_6 .

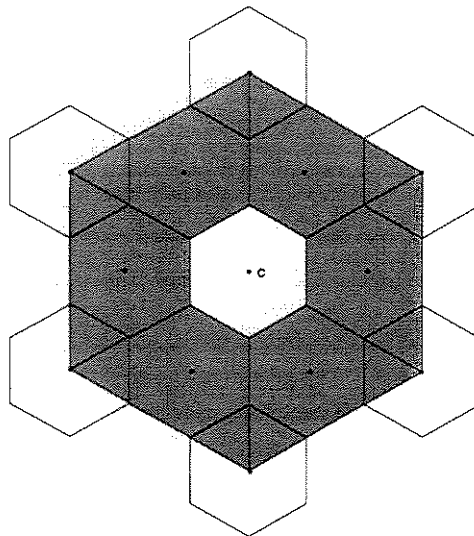


Figura 3.4: Toda a região na qual um móvel pode comunicar-se com a ERB C. A região hachurada somada à central.

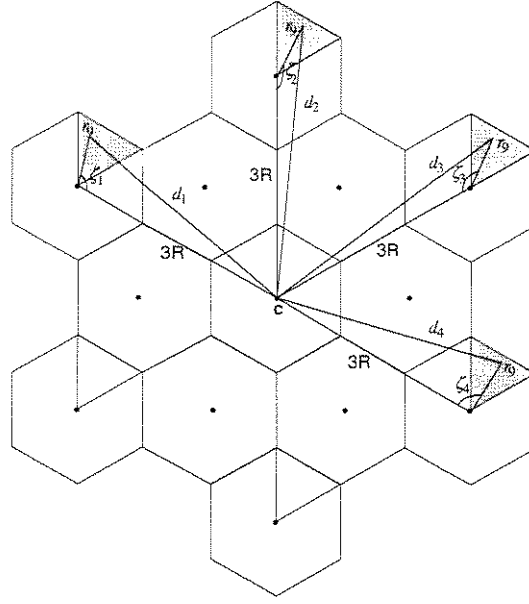


Figura 3.5: Regiões que integraremos nas quais o móvel não poderá estar conectado à ERB central.

3.2 Interferência originada nas regiões em que o móvel não comunica com a ERB C

Temos, agora, que calcular a interferência originada nas regiões em que o móvel não pode se conectar com a ERB central. Começaremos calculando a interferência originada nas regiões não hachuradas dos hexágonos externos da Fig. 3.4. Nestas regiões o móvel não se comunica com a ERB C, pois esta não está dentre as 9 ERBs mais próximas ao móvel. Novamente deslocaremos a origem do nosso sistema de coordenadas polares para estas ERBs. Calcularemos a interferência gerada nas regiões hachuradas da Fig. 3.5 e pela simetria hexagonal, também podemos multiplicar estes resultados por $6 \times n_V/6$.

Por geometria plana podemos determinar os ângulos $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ e ζ_4 mostrados na Fig. 3.5 e também as distâncias d_1, d_2, d_3 e d_4 entre o móvel e a ERB C.

$$\zeta_1 = \frac{\pi}{6} + \theta$$

$$\zeta_2 = \frac{\pi}{2} + \theta$$

$$\zeta_3 = \frac{7\pi}{6} - \theta$$

$$\zeta_4 = \frac{5\pi}{6} - \theta$$

$$d_k = \sqrt{9R^2 + r_9^2 - 6Rr_9 \cos \zeta_k}, k = 1 \dots 4$$

A atenuação até a ERB C será

$$\alpha_k = 10^{\frac{\varepsilon}{10}} d_k^\beta$$

onde $10^{-\varepsilon/10}$ modela o sombreamento log-normal, e ε tem distribuição Gaussiana.

A potência interferente que chega à ERB C gerada por um usuário em um ponto da região hachurada é

$$I_u = \frac{P_t}{\alpha_k} = P_V \frac{10^{-\frac{\varepsilon}{10}}}{d_k^\beta} \min(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8, \alpha_9)$$

Podemos observar que o sombreamento até a ERB C é independente da potência transmitida, já que o móvel não se comunica com a ERB C. Logo,

$$E_k \{I_u\} = \frac{P_V}{d_k^\beta} E \{10^{-\frac{\varepsilon}{10}}\} E \{\min(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8, \alpha_9)\}$$

Faremos $z_s = 10^{-\varepsilon/10}$, então

$$E_k \{I_u\} = \frac{P_V \bar{z}_s}{d_k^\beta} E \{\min(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8, \alpha_9)\}$$

Como o mínimo de VAs contínuas implica em eventos exclusivos, a esperança do mínimo pode ser escrita como a soma de 9 esperanças.

$$E \{\min(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8, \alpha_9)\} = \sum_{n=1}^9 E \{\alpha_n \mid \alpha_n < \alpha_j, \forall j, j \neq n\} \text{Prob}\{\alpha_n < \alpha_j, \forall j, j \neq n\}$$

Em (3.7) calculamos a probabilidade de α_1 ser menor que os demais α_i . De forma análoga temos

$$\text{Prob}\{\alpha_n \text{ menor que os demais}\} = \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^9 \frac{1}{2} \left[1 - \text{erf} \left(\frac{\varepsilon_n + 10\beta \log(r_n/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right]$$

Logo,

$$\begin{aligned} & E \{\min(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8, \alpha_9)\} \\ &= \sum_{n=1}^9 r_n^\beta \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\frac{\varepsilon_n}{10}} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^9 \frac{1}{2} \left[1 - \text{erf} \left(\frac{\varepsilon_n + 10\beta \log(r_n/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_n}(\varepsilon_n) d\varepsilon_n \end{aligned}$$

3.2. INTERFERÊNCIA ORIGINADA NAS REGIÕES EM QUE O MÓVEL NÃO COMUNICA COM A ERB C31

Temos, agora, que fazer a integração nas áreas hachuradas da Fig.3.5 da interferência gerada em um ponto.

$$E_k \{I\} = \frac{P_V \overline{z_s}}{a} \sum_{n=1}^9 \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{R}{\sin(\theta+\pi/6)}} \left(\frac{r_n}{d_k} \right)^\beta \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\frac{\varepsilon_n}{10}} \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^9 \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\varepsilon_n + 10\beta \log(r_n/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_n}(\varepsilon_n) d\varepsilon_n r_9 dr_9 d\theta \quad (3.22)$$

Analogamente, temos

$$E_k \{I^2\} = \frac{P_V^2 \overline{z_s^2}}{a} \sum_{n=1}^9 \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{R}{\sin(\theta+\pi/6)}} \left(\frac{r_n}{d_k} \right)^{2\beta} \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\frac{\varepsilon_n}{5}} \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^9 \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\varepsilon_n + 10\beta \log(r_n/r_i)}{\sqrt{2}\sigma_s} \right) \right] p_{\varepsilon_n}(\varepsilon_n) d\varepsilon_n r_9 dr_9 d\theta \quad (3.23)$$

Neste ponto temos a esperança e variância da interferência originada em cada região da Fig. 3.5. Lembramos que só integramos em quatro regiões triangulares, as outras duas regiões triangulares que completam o hexágono têm a possibilidade de comunicar-se com a ERB central e, portanto já foram consideradas na sessão anterior.

$$E \{I\} = n_V \sum_{k=1}^4 E_k \{I\} \quad (3.24)$$

$$\sigma_I^2 = n_V \sum_{k=1}^4 (E_k \{I^2\} - E_k^2 \{I\}) \quad (3.25)$$

Iremos, agora, considerar as regiões hachuradas da Fig. 3.6. Podemos usar as mesma equações (3.22) e (3.23), pois as únicas mudanças são a distância e o ângulo à ERB central. Precisamos, então, calcular estas distâncias e ângulos. Os ângulos ζ_k são

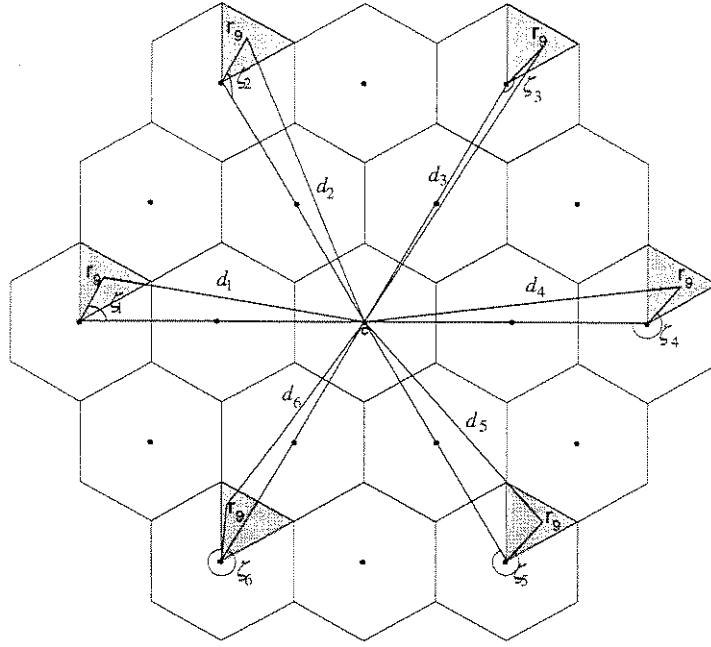


Figura 3.6: Regiões que calcularemos a estatística da interferência gerada.

$$\zeta_1 = \theta \quad (3.26)$$

$$\zeta_2 = \theta + \frac{\pi}{3}$$

$$\zeta_3 = \theta + \frac{2\pi}{3}$$

$$\zeta_4 = \theta + \pi$$

$$\zeta_5 = \theta + \frac{4\pi}{3}$$

$$\zeta_6 = \theta + \frac{5\pi}{3}$$

Observamos que devido à simetria hexagonal ocorre uma rotação de $\pi/3$ a cada região. Usaremos este resultado nos cálculos posteriores. Como as distâncias entre as ERBs é $D = 4R$, então a distância do móvel à ERB C, localizado nas regiões k de 1 a 6, é

$$d_k = \sqrt{D^2 + r_9^2 - 2Dr_9 \cos \zeta_k}, \quad k = 1 \dots 6$$

Para simplificar as expressões de ζ , às vezes usamos os ângulos externos do triângulo para calcular o lado. Podemos fazer pois, $\cos(\tau) = \cos(2\pi - \tau)$.

Usando as equações (3.22) e (3.23), a média e variância da interferência originada nas regiões hachuradas e suas simétricas da Fig. 3.6 são

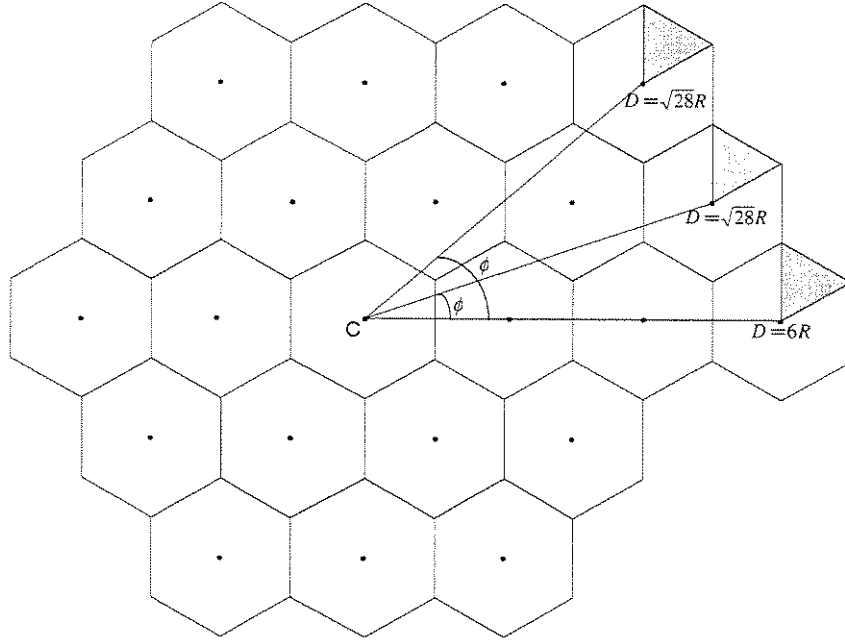


Figura 3.7: Posição de uma célula em relação à ERB central, distância e ângulo.

$$E \{I\} = n_V \sum_{k=1}^6 E_k \{I\} \quad (3.27)$$

$$\sigma_I^2 = n_V \sum_{k=1}^6 (E_k \{I^2\} - E_k^2 \{I\}) \quad (3.28)$$

Com estas equações podemos calcular a estatística da interferência gerada por qualquer célula, precisando apenas de sua posição em relação à ERB C, dada pela distância D entre as ERBs e o ângulo ϕ , que é o menor dos ângulos formado entre a reta que une a ERB C a uma das 6 ERBs simétricas e a horizontal, vide Fig. 3.7. Generalizando, temos que somar ϕ a cada ζ_k de (3.26). Observamos que para as células da Fig. 3.6 $\phi = 0$.

Na Fig. 3.7 para cada região hachurada calculamos a distância D à célula central, e o ângulo ϕ . Usando as expressões (3.22) e (3.23) calculamos a esperança e a variância da interferência.

Calculando a estatística da interferência até a sexta camada, observamos convergência nos resultados, como mostra a Tab. 3.2. Usamos perda de propagação $\beta = 4$, desvio padrão do sombreamento $\sigma_s = 8 \text{ dB}$, e desvio padrão do erro no controle de potência $\sigma_{cp} = 1 \text{ dB}$.

Camada	Núm. cel	$\sum$ Núm. cel	$E\{I\}$	$\sum E\{I\}$	σ^2	$\sum \sigma^2$
0	1	1	0,814	0,814	0,168	0,168
1	6	7	0,642	1,456	0,350	0,519
2	12	19	0,170	1,626	0,253	0,771
3	18	37	0,051	1,677	0,026	0,797
4	24	61	0,021	1,698	0,003	0,800
5	30	91	0,011	1,708	6×10^{-4}	0,801
6	36	127	0,006	1,714	2×10^{-4}	0,801

Tabela 3.2: Interferência das várias camadas, para $\beta = 4$, $\sigma_s = 8dB$ e $\sigma_{cp} = 1dB$. As colunas de somatório representam o acumulado apartir da camada 0.

3.3 Aproximação para provar a convergência

No cálculo da interferência proveniente de células onde o móvel não pode comunicar-se com a ERB central, a única diferença entre as diversas células é a posição da ERB central. Como calculamos a esperança e variância da interferência originada num hexágono em um ponto a uma distância D do centro e com ângulo ϕ , podemos facilmente calcular com boa precisão em qualquer outro ponto do espaço sem ter que recalculas as equações (3.22), (3.23), (3.27) e (3.28) que implicaria em realizar dezoito integrações triplas seis vezes, totalizando cento e oito integrações triplas.

Para obter tal simplificação, vamos calcular a média da distância de todos os pontos do hexágono elevado à $(-\beta)$ e elevado à (-2β) a um ponto qualquer do espaço com distância D e ângulo ϕ ao centro do hexágono.

$$\overline{d^{-\beta}} = \frac{\sum_{i=0}^5 \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{R}{\sin(\theta+\pi/6)}} (D^2 + r_9^2 - 2Dr_9 \cos(\theta + \phi + i\frac{\pi}{3}))^{-\frac{\beta}{2}} r_9 dr_9 d\theta}{A} \quad (3.29)$$

e

$$\overline{d^{-2\beta}} = \frac{\sum_{i=0}^5 \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{R}{\sin(\theta+\pi/6)}} (D^2 + r_9^2 - 2Dr_9 \cos(\theta + \phi + i\frac{\pi}{3}))^{-\beta} r_9 dr_9 d\theta}{A} \quad (3.30)$$

onde A é a área do hexágono, $A = 2\sqrt{3}R^2$.

Observamos que as razões

$$E_H\{I\} = \frac{E\{I\}}{\overline{d^{-\beta}}} \quad (3.31)$$

$$\sigma_H^2 = \frac{\sigma_I^2}{\overline{d^{-2\beta}}} \quad (3.32)$$

tendem a ser constantes como mostrado na Tab. 3.3, onde usamos que $\beta = 4$, $\sigma_s = 8 dB$, $\sigma_{cp} = 1 dB$. Note que $E\{I\}$ e σ_I^2 são referente à interferência originada por um usuário em um hexágono.

$D(R)$	$\phi(rd)$	$E\{I\}$	$\overline{d^{-\beta}}(R^{-4})$	$E_H\{I\}$	σ^2	$\overline{d^{-2\beta}}(R^{-8})$	σ_H^2
4	0	$1,1 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-3}$	2,42	$2,4 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-5}$	879
$\sqrt{28}$	0,33	$3,3 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-3}$	2,38	$1,9 \times 10^{-3}$	$2,2 \times 10^{-6}$	828
6	0	$1,9 \times 10^{-3}$	$8,2 \times 10^{-4}$	2,36	$6,2 \times 10^{-4}$	$7,6 \times 10^{-7}$	808
$\sqrt{48}$	0,52	$1,1 \times 10^{-3}$	$4,5 \times 10^{-4}$	2,35	$1,8 \times 10^{-4}$	$2,3 \times 10^{-7}$	793
$\sqrt{52}$	0,24	$9,1 \times 10^{-4}$	$3,9 \times 10^{-4}$	2,35	$1,3 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-7}$	789
8	0	$5,9 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-4}$	2,35	$5,4 \times 10^{-5}$	$6,9 \times 10^{-8}$	781
$\sqrt{76}$	0,41	$4,2 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-4}$	2,34	$2,6 \times 10^{-5}$	$3,4 \times 10^{-8}$	775
$\sqrt{84}$	0,19	$3,4 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-4}$	2,34	$1,7 \times 10^{-5}$	$2,2 \times 10^{-8}$	772
10	0	$2,4 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-4}$	2,34	$8,4 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-8}$	767
100	0	$2,3 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-8}$	2,32	$7,4 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-16}$	743
1000	0	$2,3 \times 10^{-12}$	$1,0 \times 10^{-12}$	2,32	$7,4 \times 10^{-22}$	$1,0 \times 10^{-24}$	743

Tabela 3.3: $E_H\{I\}$ e σ_H^2 em função da posição da célula em relação à ERB central, (D, ϕ) , para $\beta = 4$, $\sigma_s = 8dB$ e $\sigma_{cp} = 1dB$

Na tabela observamos que $E_H\{I\}$ e σ_H^2 diminuem assintoticamente à medida que o hexágono afasta-se da ERB central.

Para calcular a esperança da interferência gerada por um usuário uniformemente distribuído em um hexágono em um ponto qualquer do plano, multiplicamos a constante $E_H\{I\}$ por $\overline{d^{-\beta}}$, para a variância, multiplicamos a constante σ_H^2 por $\overline{d^{-2\beta}}$. Com esta aproximação, para calcularmos a estatística da interferência originada em um hexágono, na ERB central, diminuimos de 108 integrações triplas para 12 integrações duplas.

Usando estas aproximações, calculamos a esperança e variância da interferência das células das camadas 7 à 200, que contêm juntas 120.474 células. A esperança e a variância são

$$\begin{aligned} E\{I\}_{\text{total}} &= 0,0152n_V P_V \\ \sigma_{I_{\text{total}}}^2 &= 8,79 \times 10^{-5}n_V P_V^2 \end{aligned}$$

Somando aos resultados da Tab. 3.2 temos a esperança e a variância da interferência total na ERB central. Para calcular o desvio padrão, extraímos a raiz quadrada da variância.

$$\begin{aligned} E\{I\} &= 1,730n_V P_V \\ \sigma_I &= 0,895\sqrt{n_V} P_V \end{aligned}$$

Observamos que os resultados obtidos nesta seção são desprezíveis em relação à interferência calculada na seção anterior, quando a média passou de 1,714 para 1,730, ou seja, um aumento de apenas 1%, e o desvio padrão sofreu um aumento relativo de apenas 5×10^{-5} . No entanto, achamos interessante, como forma de provar a convergência da interferência proveniente de todas as células do sistema. Para os parâmetros usados, perda de propagação proporcional à quarta potência da distância e sombreado com desvio padrão de 8 dB, concluímos que um cálculo considerando apenas 4 camadas de células ao redor da célula central já é suficientemente preciso, pois a modelagem já contém aproximações.

3.4 Introdução do fator de atividade de voz

Como a fala é modelada como um processo com interrupções, partes do tempo de conversação são de silêncio. Pode-se, então, diminuir a interferência gerada, diminuindo a potência transmitida nos intervalos de silêncio. Apesar de nos intervalos de silêncio o móvel transmitir potência baixa, neste modelamento aproximaremos que nenhuma potência é transmitida, conforme encontramos na literatura [1], [2], [7]. Podemos modelar a nova potência transmitida considerando fator de atividade de voz. A potência transmitida P_t já calculada, será multiplicada por uma VA binomial η que pode assumir valores 0 ou 1, com média λ . A potência interferente, I , que chega na ERB proveniente de um usuário, também será multiplicada por η , ou seja, ηI , que a seguir calcularemos a sua média e variância.

$$E\{\eta I\} = E\{\eta\}E\{I\} = \lambda E\{I\}$$

Como $\eta = 0$ ou $\eta = 1$, logo

$$E\{\eta^2\} = E\{\eta\} = \lambda$$

e

$$E\{(\eta I)^2\} = E\{\eta^2\}E\{I^2\} = \lambda E\{I^2\}$$

Portanto,

$$\sigma_{\eta I}^2 = \lambda E\{I^2\} - \lambda^2 [E\{I\}]^2 \quad (3.33)$$

Lembramos que I é a potência interferente que chega na ERB central proveniente de um usuário uniformemente distribuído em uma região triangular, na qual existem $n_V/6$ usuários. Como nossa área de integração é uma região triangular equivalente a um sexto do hexágono, calcularemos a variância (3.33) em cada região desta, causada por $n_V/6$ usuários e depois as somaremos. Desta forma estamos considerando o primeiro e segundo momento da interferência ocasionada por um usuário uniformemente distribuído em cada região triangular. Se considerássemos um usuário uniformemente distribuído em cada região hexagonal, teríamos resultados diferentes. No cálculo da média obteríamos o mesmo resultado, devido ao fato de ser uma operação linear, mas obteríamos resultados diferentes para a variância. Uma forma errada de se fazer, é calcular o primeiro e segundo momento da interferência total originada nas quatro primeiras camadas e dividir pelo número de usuários total nestas camadas, desta forma, está-se considerando que cada usuário, independente de sua proximidade com a ERB central, gera interferência com mesma média e variância, que é um absurdo. Com os resultados anteriormente obtidos calcularemos a nova variância, portanto necessitamos de uma tabela mais detalhada que a Tab. 3.2, pois precisamos das médias e variâncias parciais em

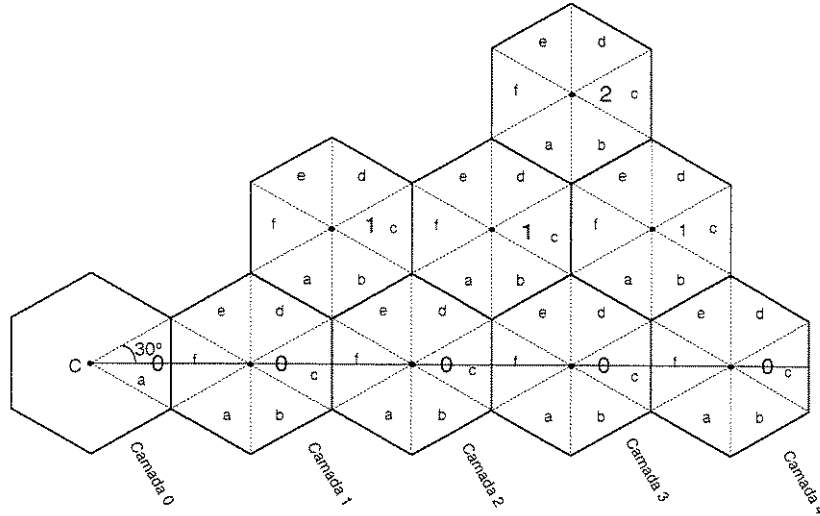


Figura 3.8: As quatro camadas mais próximas à ERB central.

cada região de cada célula, e não o total por camada. Usaremos da simetria da disposição das células para simplificar nossos cálculos. Rotularemos cada região de cada célula usando três coordenadas (c, i, r) onde c indica a camada da célula, i o índice da célula na camada e r a região na célula, que varia de a à f .

Na Tab. 3.4 mostramos o cálculo para as regiões na célula central e nas células das camadas 1 e 2. Na Tab. 3.5 mostramos apenas os resultado totais das camadas, apesar de termos feito o cálculo por região. Na Fig. 3.8 mostramos as células das quatro camadas mais próximas em um ângulo de 30° . As demais células, por simetria, geram interferências com mesma estatística. Para designar as células usaremos apenas duas coordenadas, (camada, índice). Algumas células têm mais 5 simétricas como as : $(2,0)$; $(2,1)$; $(3,0)$; $(4,0)$ e $(4,2)$. Outras têm mais 11 simétricas como as : $(3,1)$ e $(4,1)$. As células que estão totalmente internas no setor de 30° têm mais 11 simétricas, e as demais apenas 5.

Lembramos que para calcular a média basta multiplicar a esperança calculada na seção anterior por λ , assim, teremos um resultado mais preciso que considerando apenas as quatro primeiras camadas. A média da interferência, de um sistemas com os parâmetros $\beta = 4$, $\sigma_s = 8 \text{ dB}$, $\sigma_{pc} = 1 \text{ dB}$ e $\lambda = 0,4$ é

$$E\{I\} = 0,692n_V P_V$$

Na Tab. 3.5 a média calculada, considerando apenas as quatro primeiras camadas foi de $0,679n_V P_V$ e a variância foi de $0,502n_V P_V^2$. Logo o desvio padrão é

$$\sigma_I = 0,710\sqrt{n_V} P_V$$

Camada	Índice	Região	$E\{I\}$	σ_I^2	$E\{I^2\}$	$\sigma_{\eta I}^2$	$E\{\eta I\}$
0	0	<i>a</i>	0,814	0,168	0,831	0,226	0,326
1	0	<i>a</i>	0,128	0,073	0,090	0,033	0,051
1	0	<i>b</i>	0,044	0,020	0,022	0,008	0,017
1	0	<i>c</i>	0,030	0,012	0,013	0,005	0,012
1	0	<i>d</i>	0,044	0,020	0,022	0,008	0,017
1	0	<i>e</i>	0,128	0,073	0,090	0,033	0,051
1	0	<i>f</i>	0,269	0,153	0,225	0,078	0,108
2	1	<i>a</i>	0,029	0,012	0,013	0,005	0,012
2	1	<i>b</i>	0,015	0,036	0,036	0,014	0,006
2	1	<i>c</i>	0,008	0,008	0,008	0,003	0,003
2	1	<i>d</i>	0,008	0,008	0,008	0,003	0,003
2	1	<i>e</i>	0,015	0,036	0,036	0,014	0,006
2	1	<i>f</i>	0,029	0,012	0,013	0,005	0,012
2	0	<i>a</i>	0,013	0,028	0,028	0,011	0,005
2	0	<i>b</i>	0,006	0,005	0,005	0,002	0,002
2	0	<i>c</i>	0,004	0,003	0,003	0,001	0,002
2	0	<i>d</i>	0,006	0,005	0,005	0,002	0,002
2	0	<i>e</i>	0,013	0,028	0,028	0,011	0,005
2	0	<i>f</i>	0,022	0,072	0,072	0,029	0,009

Tabela 3.4: Esperança e variância da interferência na ERB central, considerando fator de atividade de voz. Camadas : central, 1 e 2, conforme disposição da Fig. 3.8, , para $\beta = 4$, $\sigma_s = 8dB$, $\sigma_{cp} = 1dB$ e $\lambda = 0,4$

Camada	$E\{\eta I\}$	$\sum E\{\eta I\}$	$\sigma_{\eta I}^2$	$\sum \sigma_{\eta I}^2$
0	0,326	0,326	0,226	0,226
1	0,257	0,582	0,166	0,393
2	0,068	0,650	0,102	0,495
3	0,020	0,671	0,006	0,501
4	0,008	0,679	8×10^{-4}	0,502

Tabela 3.5: Esperança e variância da interferência na ERB central, considerando fator de atividade de voz. Resultados até a camada 4, para $\beta = 4$, $\sigma_s = 8dB$, $\sigma_{cp} = 1dB$ e $\lambda = 0,4$. As colunas de somatório representam o acumulado apartir da camada 0.

3.5 Cálculo da capacidade do sistema CDMA

A este ponto sabemos como calcular a média e variância da potência que chega na ERB central. Observamos que a interferência é um somatório de VAs com distribuição log-normal. Com base em [6] consideraremos a interferência total com sendo uma log-normal, aproximação, também, muito usada na literatura.

Calculamos na seção anterior a potência interferente gerada por todos os usuários, inclusive pelo o usuário sobre a qual calcularemos a relação sinal ruído. Devemos, então, subtrair da média e da variância a provocada pelo usuário sobre o qual calcularemos a relação sinal ruído. Surge um problema. Em qual das 9 possíveis regiões está o nosso usuário? Se ele estiver na região central, ou seja, região (0,0,a) da Fig. 3.8, sua contribuição será maior. A média é $E\{\eta I\} = 0,33P_V$ e $\sigma_{\eta I}^2 = 0,23P_V$, ver Tab. 3.4. Podendo neste caso, até alterar o resultado do cálculo da capacidade de usuários no sistema. Caso isso ocorra, nossa preocupação terá sido válida. Se ele estiver na região mais afastada, (2,1,a) sua contribuição será tão pequena, $E\{\eta I\} = 0,012P_V$ e $\sigma_{\eta I}^2 = 0,005P_V$, ver Tab. 3.4, que seguramente podemos desprezar. Este será nosso pior caso, e o sistema tem que atender a este usuário, portanto podemos desprezar a interferência do usuário considerado. Por curiosidade resolvemos fazer os dois cálculos. Teremos, então, as duas opções abaixo para a média e variância da interferência, para $\beta = 4$, $\sigma_s = 8$ dB, $\sigma_{cp} = 1$ dB, $\lambda = 0,4$.

$$E\{\eta I\} = 0,692n_V P_V$$

$$\sigma_{\eta I}^2 = 0,502n_V P_V^2$$

ou

$$E\{\eta I\} = 0,692n_V P_V - 0,33P_V$$

$$\sigma_{\eta I}^2 = 0,502n_V P_V^2 - 0,23P_V^2$$

A relação sinal ruído é dada por

$$\gamma_V = \frac{W}{r_V} \frac{P_V z_{cp}}{I} \quad (3.34)$$

onde z_{cp} é uma log-normal que modela o erro no controle de potência, e r_V é a taxa de transmissão dos usuários de voz. Usamos $\sigma_{cp} = 1$ dB para desvio padrão, e média logaritmica nula.

Queremos o valor máximo para n_V tal que a probabilidade de γ ser menor que $\gamma_{\min}$ seja igual à OP desejada. Usando a equação (2.10) temos que

$$P\{\text{perda de desempenho}\} = \frac{1}{2} \int_0^\infty \left(1 + \operatorname{Erf} \left(\frac{10 \log \frac{r_V \gamma_{\min} x}{W P_V}}{\sqrt{2} \sigma_{cp}} \right) \right) p_I(x) dx \quad (3.35)$$

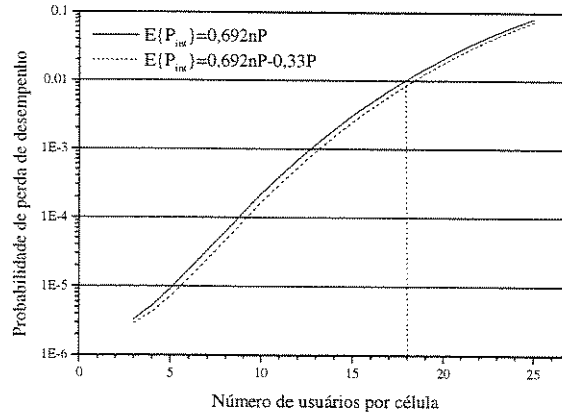


Figura 3.9: Probabilidade de perda de desempenho versus número de usuários por célula, para $\beta = 4$, $\sigma_s = 8$ dB, $\sigma_{cp} = 1$ dB, $\lambda = 0,4$, $W = 1,25$ MHz e $r_V = 9600$ kbits/s.

Como σ_{cp} é o desvio padrão da Gaussiana em dB que gera a log-normal, entramos diretamente com o valor em dB na expressão (3.35).

Na Fig. 3.9 traçamos a curva da probabilidade de perda de desempenho variando o número de usuários por célula, usamos $W = 1,25$ MHz e $r_V = 9600$ kbits/s. Considerando os dois casos, a interferência como sendo a potência total na ERB, e também subtraindo o sinal desejado da interferência total. Observamos que as duas curvas são muito próximas e ambas implicam no máximo em 18 usuários por célula tal que $\text{Prob}\{\gamma < 7 \text{ dB}\} = 1\%$. Portanto subtraindo, ou não, a potência do usuário da potência total que chega a ERB a diferença é desprezível. Com base nos cálculos até aqui apresentados a capacidade do sistema CDMA sem setorização e com monitorização da atividade de voz é de 18 usuários por célula. Usando setorização ideal com três setores multiplica-se a capacidade por 3 implicando em 54 usuários por célula. No capítulo de resultados faremos uma comparação com os resultados encontrados na literatura, pois temos que usar os mesmos parâmetros.

3.6 Redistribuição de usuários

Nesta seção iremos tentar aumentar a capacidade de usuários em uma célula caso a interferência proveniente das outras células esteja baixa devido a poucos usuários nestas células. Para tal, temos que analisar a interferência que será gerada nas demais ERBs e precisamos saber com alguma precisão a posição do móvel. Como nossos cálculos são baseados na região onde está o móvel, esta informação será suficiente. A Tab. 3.6 mostra a média da interferência causada nas ERBs mais próximas. Através desta médias o sistema pode estimar a região onde está o móvel. Obviamente estamos supondo que o sistema tem uma boa capacidade de processamento para monitorar todos os usuários.

Para os parâmetros usados, calculamos na seção anterior que o sistema comporta 18

usuários por célula, a que chamaremos de $n_{VC\max}$, o que implica numa interferência máxima nas ERBs com a seguinte média e variância dadas por

$$\begin{aligned} E\{I_{\max}\} &= n_{VC\max} \frac{E\{I\}}{n_V} \\ \sigma_{I_{\max}}^2 &= n_{VC\max} \frac{\sigma_I^2}{n_V} \end{aligned}$$

Para saber a média da interferência máxima na ERB causada pelos usuários da própria célula, $E\{I_{C\max}\}$ temos que multiplicar a interferência média causada por um usuário na região central, que é $E\{I_{0,0,a}\}$, pelo número máximo de usuários na célula $n_{VC\max}$.

$$E\{I_{C\max}\} = n_{VC\max} E\{I_{0,0,a}\} \quad (3.36)$$

Note que, $E\{I_{C\max}\}$ é sempre menor que $E\{I_{\max}\}$, pois esta é a soma da primeira com a média da interferência gerada nas demais células do sistema. Então, se as células vizinhas estiverem operando abaixo da capacidade máxima, poderá ser possível atender mais que $n_{VC\max}$ usuários numa determinada célula, havendo tal demanda. O caso extremo ocorre quando há somente demanda em uma célula do sistema, e as demais estão todas vazias.

Para os parâmetros aqui considerados, $E\{I_{\max}\} = 12,46P_V$ e $\sigma_{I_{\max}}^2 = 9,04P_V^2$. A média da interferência causada por um usuário na própria célula é $0,326P_V$, então os 18 usuários da célula gerarão interferência de média $18 \times 0,326P_V = 5,87P_V$, que equivale a somente 47% da interferência total. Quando todas as demais células do sistema estiverem vazias, uma célula pode abrigar 38 usuários, o que implica numa interferência com média $38 \times 0,326P_V = 12,39P_V$ e variância $38 \times 0,226P_V = 8,59P_V$ ambas abaixo do máximo suportado. Portanto, dependendo da demanda do sistema podemos ter células com até 38 usuários.

Para uma célula atender a mais de $n_{VC\max}$ usuários é necessário analisar o aumento da interferência nas demais ERBs do sistema. A Tab. 3.6 mostra a interferência causada por um usuário na região hachurada da célula central, nas ERBs da primeira e segunda camada, conforme indicado na Fig. 3.10. Para um usuário ser atendido será necessário verificar se todas as ERBs mais próximas comportarão o aumento calculado na interferência. Ou seja, se as seguintes condições de (3.37) são satisfeitas para a própria ERB, e as da primeira e segunda camada

$$\begin{aligned} E\{I\} + E\{I_{c,i,r}\} &< E\{I_{\max}\} \\ \sigma_I^2 + \sigma_{I_{c,i,r}}^2 &< \sigma_{I_{\max}}^2 \end{aligned} \quad (3.37)$$

onde $E\{I\}$ e σ_I^2 são a esperança e variância da atual interferência na ERB_{c,i,r} e $E\{I_{c,i,r}\}$ e $\sigma_{I_{c,i,r}}^2$ são o aumento da média e variância da interferência na ERB_{c,i,r} causado por um usuário novo na região central da Fig. 3.10. Caso alguma das condições de (3.37) não seja satisfeita o usuário não poderá ser conectado.

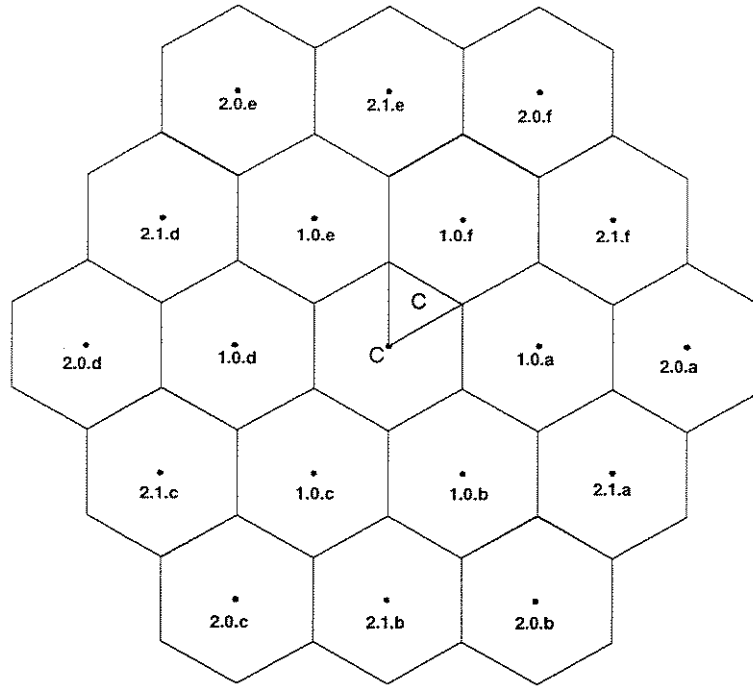


Figura 3.10: Disposição das ERBs da primeira e segunda camada.

ERB	$E\{I_{c,i,r}\}$	$\sigma_{I_{c,i,r}}$	$\frac{\sigma}{E\{I\}}$	ERB	$E\{I_{c,i,r}\}$	$\sigma_{I_{c,i,r}}$	$\frac{\sigma}{E\{I\}}$	ERB	$E\{I_{c,i,r}\}$	$\sigma_{I_{c,i,r}}$	$\frac{\sigma}{E\{I\}}$
C	0,326	0,475	1,46	-	-	-	-	-	-	-	-
1.0.a	0,051	0,182	3,56	2.0.a	0,005	0,105	21,0	2.1.a	0,006	0,118	19,7
1.0.b	0,017	0,089	5,26	2.0.b	0,002	0,045	22,4	2.1.b	0,003	0,055	18,3
1.0.c	0,012	0,071	5,89	2.0.c	0,002	0,032	15,8	2.1.c	0,003	0,055	18,3
1.0.d	0,017	0,089	5,26	2.0.d	0,002	0,045	22,4	2.1.d	0,006	0,118	19,7
1.0.e	0,051	0,182	3,56	2.0.e	0,005	0,105	21,0	2.1.e	0,012	0,071	5,89
1.0.f	0,108	0,279	2,59	2.0.f	0,009	0,170	18,9	2.1.f	0,012	0,071	5,89

Tabela 3.6: Interferência gerada por um usuário de voz, uniformemente distribuído na região triangular, na ERB central e nas ERBs da primeira e segunda camada, conforme distribuição da Fig. 3.10. Valores normalizados em relação à P_V , para $\beta = 4$, $\sigma_s = 8dB$, $\sigma_{cp} = 1dB$ e $\lambda = 0,4$

A verificação das condições (3.37) pode ser facilmente feita pela central de controle das ERBs, pois esta sabe a potência interferente em todas as ERBs. Consideramos que uma análise até a segunda camada de ERBs é suficiente, pois a interferência gerada na terceira camada em diante é muito pequena. Talvez uma análise somente da primeira camada já seria suficiente. Obviamente esta decisão depende dos parâmetros do sistema. Analisamos para perda de percurso na quarta potência : para perdas menores talvez fosse necessário analisar a interferência nas ERBs de mais camadas.

Com esta otimização do sistema, visando atender ao máximo número de usuários, pode-se ter problemas. Quando uma célula estiver atendendo a mais que $n_{VC\max}$ usuários, as células vizinhas estarão impossibilitadas de atender a sua cota de $n_{VC\max}$ usuários, pois elas a cederam para outra célula. Se algum usuário localizado numa célula com menos de $n_{VC\max}$ usuários quiser conexão, alguns usuários da célula, que estiver operando acima da capacidade, devem ser desconectados do sistema. Devemos tomar esta precaução, pois o sistema só estará operando na capacidade máxima quando todas as células estiverem com a mesma carga.

Capítulo 4

Sistema multimídia CDMA

4.1 Sistema balanceado

Com os cálculos até aqui desenvolvidos podemos estimar através da média e variância, a interferência gerada nas outras células. Vamos, então, propor um meio de atribuir potência para um sistema multimídia CDMA. Temos a intenção de designar a maior potência possível aos usuários de dados mantendo a qualidade de serviço de todos os usuários do sistema. A taxa de transmissão dos usuários de dados será proporcional a esta potência e temos o interesse de tornar disponível a maior taxa de transmissão possível. Assim, teremos que analisar as implicações desta potência nas demais ERBs do sistema.

No capítulo anterior mostramos que podemos aumentar o número de usuários em uma célula, se as vizinhas estiverem operando abaixo da capacidade máxima. Analogamente, quando o sistema estiver operando com menos usuários de voz que a sua capacidade máxima, iremos usar a folga na interferência gerada para alocar potência a usuários de dados. Em um sistema por divisão de frequência (FDMA) tem-se limitação na alocação de bandas para os usuários. Já o sistema CDMA tem limitação na alocação de potência. Quando houver usuários de dados no sistema, queremos que estes transmitam com a maior potência possível. O sistema estará otimizado quando a interferência nas ERBs estiver no limite máximo suportado, pois nesta situação estaremos transmitindo a máxima potência, o que implica numa máxima transmissão de bits de informação. Quando falamos que devemos operar transmitindo máxima potência, estamos falando da potência relativa à nominal de um usuário de voz, caso contrário poderíamos aumentar indefinidamente a potência de todos os usuários do sistema, o que não oferece nenhum ganho, apenas reduz os efeitos do ruído térmico, que já estamos desprezando. Este sistema é similar ao proposto no capítulo 2. A única diferença é que o sistema contém diversas células e temos que nos preocupar com a interferência gerada nelas.

Na Tab. 4.1 listamos os valores da média e variância da interferência causada por um usuário de dados na ERB C e nas ERBs da primeira e segunda camadas. Estes valores estão normalizados pela potência nominal de um usuário de voz, portanto devem ainda ser multiplicados pela potência do usuário de dados. Nesta tabela usamos os valores previamente

ERB	$E\{I_{c,i,r}\}$	$\sigma_{I_{c,i,r}}$	$\frac{\sigma}{E\{I\}}$	ERB	$E\{I_{c,i,r}\}$	$\sigma_{I_{c,i,r}}$	$\frac{\sigma}{E\{I\}}$	ERB	$E\{I_{c,i,r}\}$	$\sigma_{I_{c,i,r}}$	$\frac{\sigma}{E\{I\}}$
C	0,814	0,410	0,50	-	-	-	-	-	-	-	-
1.0.a	0,128	0,270	2,11	2.0.a	0,013	0,167	12,9	2.1.a	0,015	0,190	12,7
1.0.b	0,044	0,141	3,21	2.0.b	0,006	0,071	11,8	2.1.b	0,008	0,110	13,7
1.0.c	0,030	0,110	3,65	2.0.c	0,004	0,055	13,7	2.1.c	0,008	0,089	11,2
1.0.d	0,044	0,141	3,21	2.0.d	0,006	0,071	11,8	2.1.d	0,015	0,190	12,7
1.0.e	0,128	0,270	2,11	2.0.e	0,013	0,167	12,9	2.1.e	0,029	0,110	3,78
1.0.f	0,269	0,391	1,45	2.0.f	0,022	0,268	12,2	2.1.f	0,029	0,110	3,78

Tabela 4.1: Interferência gerada por um usuário de dados, uniformemente distribuído na região triangular, na ERB central e nas ERBs da primeira e segunda camada, conforme a distribuição da Fig. 3.10. Valores normalizados em relação à P_V , para $\beta = 4$, $\sigma_s = 8dB$ e $\sigma_{cp} = 1dB$

calculados para usuários de voz sem monitorização do fator de atividade de voz.

Queremos atribuir a máxima potência aos usuários de dados, de forma que a interferência nas ERBs do sistema seja a máxima possível. Esta situação só é possível quando todas as regiões triangulares das células estiverem com a mesma carga. Chamaremos de carga a potência transmitida pelos usuários da região triangular das células. Temos interesse que os usuários de cada região gerem toda sua cota de interferência na ERB do centro, ou seja, que a média da interferência gerada numa região na ERB em seu centro seja

$$E\{I_{R\max}\} = \frac{n_{VC\max}}{6} E\{I_{0,0,a}\} \quad (4.1)$$

Com o intuito de evitar definir mais uma variável, para a média da interferência causada por um usuário de dados, usaremos a média da interferência causada por um usuário de voz dividida pelo fator de atividade de voz λ .

Atribuiremos aos usuários de dados o restante da potência não gerada pelos usuários de voz desta região, tal que a média da interferência causada por estes usuários na ERB C seja $E\{I_{R\max}\}$. Logo,

$$E\{I_V\} + \frac{E\{I_{0,0,a}\}}{\lambda} n_D P_D = E\{I_{R\max}\} \quad (4.2)$$

Não nos preocupamos com a variância da interferência causada, pois a média é mais importante que o desvio padrão. Observamos que os usuários de dados causam menor desvio padrão da interferência na ERB que os usuário de voz, para a mesma média da interferência, como mostrado pela relação $\sigma_I/E\{I\}$ que é sempre menor na Tab. 4.1 para usuários de dados que na Tab. 3.6 para usuários de voz. No cálculo da OP usamos a variância dos usuários de voz para calcular a capacidade máxima de usuários. Logo quando substituímos usuários de voz por usuários de dados, o sistema terá uma OP mais baixa.

Agora que já temos um critério para atribuir potência aos usuários de dados temos que definir suas taxas de transmissão, queremos manter constante a média da relação sinal ruído

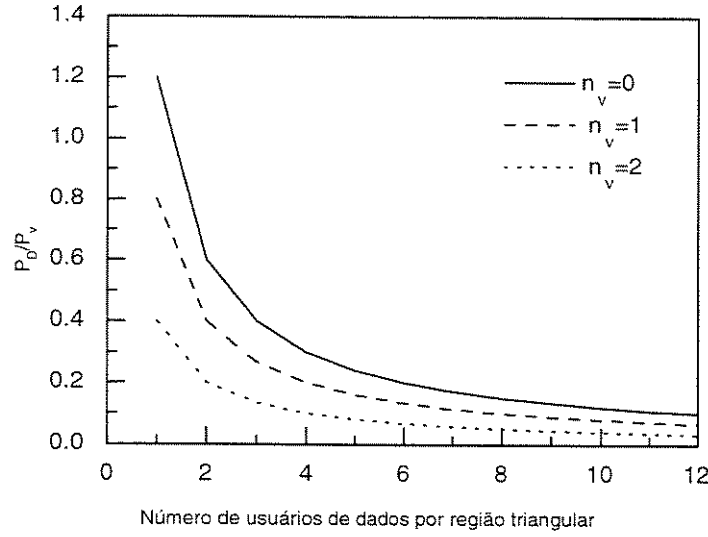


Figura 4.1: Potência atribuída a um usuário de dados. Valor relativo à potência nominal atribuída para um usuário de voz. Parametrizado pelo número de usuários de voz em cada região triangular, para $\beta = 4$, $\sigma_s = 8$ dB, $\sigma_{cp} = 1$ dB, e $\lambda = 0,4$.

(3.34), logo

$$r_D = \frac{P_D}{P_V} r_V \quad (4.3)$$

Analisaremos um sistema equilibrado, com todas as regiões triangulares com o mesmo número de usuários de voz e de dados. Variaremos o número de usuários de voz de zero a dois por região, e para cada um desses casos variaremos o número de usuários de dados de 1 à 12.

À medida que aumentamos o número de usuários de voz percebemos um pequeno aumento na OP, $OP(n_v = 0) = 0,0060$, $OP(n_v = 1) = 0,0074$ e $OP(n_v = 2) = 0,0089$. Apesar de nos três casos termos mantido a esperança da interferência constante, à medida que aumenta o número de usuários de voz, aumenta também a variância da interferência, que é responsável pelo pequeno aumento na OP. Observamos que variando o número de usuários de dados não tivemos variação na OP. Na Fig. 4.1 mostramos a potência atribuída aos usuários de dados, em função da quantidade destes usuários, parametrizado pelo número de usuários de voz. Na Fig. 4.2 mostramos a taxa de transmissão dos usuários de dados. Como limitamos a potência transmitida pelos usuários de uma região à mesma da transmitida por três usuários de voz, que é a capacidade do sistema, não iremos prejudicar as demais ERBs do sistema.

Iremos comparar estes resultados com os obtidos no capítulo 2 de um sistema unicolor. No entanto, neste capítulo analisamos por número de usuários em cada região triangular e anteriormente analisamos por número de usuários por célula. Como existem 6 regiões em uma célula teremos que multiplicar o número de usuários por 6. Na Fig. 2.4 analisamos a potência e a taxa de transmissão dos usuários de dados com 12 usuários de voz na célula, o que equivale a 2 usuários de voz por região triangular. Nas Figs. 4.1 e 4.2 observamos que

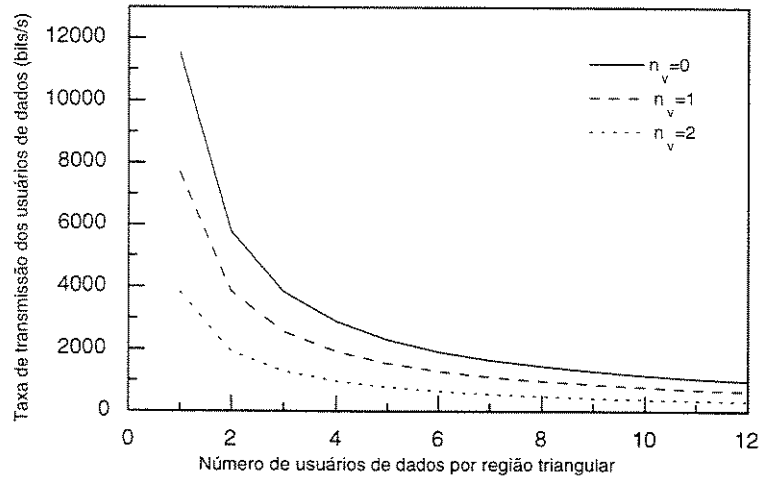


Figura 4.2: Taxa de transmissão de bits de um usuário de dados, parametrizado pelo número de usuários de voz em cada região triangular, para $\beta = 4$, $\sigma_s = 8$ dB, $\sigma_{cp} = 1$ dB, e $\lambda = 0, 4$.

a taxa e potência dos usuários de dados são menores que as encontradas no capítulo 2. Isso ocorre porque estamos, agora, considerando a interferência proveniente de outras células, que faz com que diminua a capacidade do sistema.

4.2 Sistema desbalanceado

A forma de atribuir potência aos usuários de dados, proposta na seção anterior só é ótima quando em cada região houver pelo menos um usuário de dados, portanto proporemos uma forma mais flexível de atribuir potência aos usuários de dados do sistema. Nosso objetivo é que todas as ERBs operem com a máxima interferência. Se após o controle de potência por região, a interferência em uma ERB continuar abaixo do máximo, é porque algumas regiões estão gerando menos interferência na ERB que a sua cota $E\{I_{R_{\max}}\}$. Caso esteja abaixo deste limitante, tentaremos distribuir a potência disponível igualmente entre as regiões onde houverem usuários de dados. As seis regiões ao redor da ERB juntas podem gerar interferência na ERB com média $E\{I_{C_{\max}}\}$. Esta interferência é a gerada por todos os usuários da célula na ERB ao centro. Se alguma das seis regiões ao redor da ERB não possuir usuário de dados ou se não tiver o número máximo de usuários de voz (3 para os parâmetros considerados) então os usuários desta região não estarão transmitindo sua cota de potência permitida, e o sistema não estará operando na máxima capacidade de transmissão. Uma forma de tentar aumentar a capacidade de transmissão do sistema é fazer com que a interferência gerada na célula chegue na ERB com média $E\{I_{C_{\max}}\}$. Tentaremos redistribuir a potência não gerada em algumas regiões sem usuários de dados, para outras onde haja usuários de dados. Quando fazemos isto estamos permitindo que algumas regiões gerem mais interferência que a sua cota. Não prejudicaremos a ERB ao centro, pois há regiões transmitindo abaixo da cota. No entanto teremos que checar se as ERBs vizinhas comportam esta redistribuição. Se

5 regiões de uma célula estão vazias certamente não poderemos alocar toda a potência aos usuários da sexta região, pois a ERB vizinha sofrerá um grande aumento de interferência e provavelmente terá a relação sinal ruído dos usuários a ela conectados abaixo do aceitável. Chamaremos de $E\{I_C\}$ a média da interferência gerada por todos usuários da célula na ERB ao centro, após a otimização por região já feita. O que faltar para completar $E\{I_{C_{\max}}\}$ dividiremos por $E\{I_{0,0,a}\}/\lambda$ que é a potência gerada na ERB por um usuário de dados, de forma que chegue P_V na ERB. Este é o acréscimo de potência que podemos gerar na célula. Dividiremos este acréscimo entre as regiões onde haja usuários de dados, n_R é o número de regiões com usuários de dados. De forma que todas as regiões com usuários de dados gerem a mesma interferência e o sistema esteja o mais balanceado possível, pois assim reduz a possibilidade de prejudicar uma ERB vizinha que esteja perto de uma região que gere muita potência. Em cada uma destas regiões com usuários de dados dividiremos o acréscimo de potência a ela permitido, pelo número de usuários de dados nela localizados n_{DR_j} , $j = 1 \dots n_R$. O acréscimo de potência permitida aos usuário de dados em uma região j será então

$$\Delta P_{D_i} = \frac{E\{I_{C_{\max}}\} - E\{I_C\}}{\frac{E\{I_{0,0,a}\}}{\lambda} n_R n_{DR_j}} \quad (4.4)$$

Lembramos que este valor está normalizado por P_V , portanto o acréscimo de potência permitido a um usuário de dados é $\Delta P_D P_V$.

Para verificar se as ERBs mais próximas suportarão este acréscimo de interferência, calculamos o acréscimo máximo de potência que cada usuário de uma região pode transmitir sem prejudicar a comunicação das ERBs da primeiras e segunda camada. Este acréscimo máximo é a menor potência adicional suportada por qualquer ERB da primeira e segunda camada, e é dado pela seguinte expressão

$$\Delta P_{D_{\max}} = \frac{\min_{c,i,r} [(E\{I_{\max}\} - E\{I\}) / (E\{I_{c,i,r}\} / \lambda)]}{n_R n_{DR_j}} \quad (4.5)$$

mínimo em c, i, r de forma a verificar todas as ERBs da primeira e segunda camada. Onde $E\{I\}$ é a média da interferência total em uma ERB e $E\{I_{c,i,r}\}$ é a interferência que um usuário da região analisada, comunicando-se com potência $P = 1$, gera na ERB considerada. Este valor também está normalizado em relação à P_V .

Se ΔP_D for menor que $\Delta P_{D_{\max}}$, então a potência adicional atribuída aos usuários de dados em uma região não irá atrapalhar as ERBs da primeira e segunda camadas, caso contrário adicionaremos apenas $\Delta P_{D_{\max}}$ a cada usuário desta região. Quando $\Delta P_{D_{\max}}$ for menor que ΔP_D não conseguiremos que os usuários da célula gerem a máxima interferência na ERB. Tentaremos pelo mesmo processo redistribuir a potência restante para os demais usuários de dados da célula, que estiverem localizados nas regiões onde $\Delta P_{D_{\max}}$ tenha sido maior que ΔP_D . Pode haver situações onde não conseguiremos satisfazer esta condição, ou porque não há usuário de dados nesta célula, ou porque eles estão mal distribuídos, concentrados em poucas regiões, e a potência interferente nas ERBs vizinhas seria muito

grande. O sistema deve sempre estar checando se existe algum novo usuário de voz querendo se conectar, mesmo estando operando no limite máximo de interferência. Nesta situação deve-se abaixar a potência dos usuários de dados para que o novo usuário de voz possa se conectar.

Exemplo :

Neste exemplo usaremos os seguintes parâmetros : $W = 1,25$ MHz, $r = 9600$ bits/s, $\beta = 4$, $\sigma_s = 8$ dB, $\sigma_{cp} = 1$ dB, e $\lambda = 0,4$.

Suponhamos que temos uma célula com a seguinte distribuição de usuários :

Região a : 3 usuários de voz

Região b : 1 usuário de dados

Região c : nenhum usuário

Região d : 1 usuário de voz e 4 de dados

Região e : 1 usuário de voz

Região f : nenhum usuário

Usaremos o valor de $E\{I_{0,0,a}\}$ dado na Tab. 3.6. Após a atribuição de potência aos usuários de dados, por região teremos :

A região “a” na capacidade máxima, cada usuário de voz com P_V totalizando $3P_V$, gerando na ERB C interferência de média $E\{I\} = 3 \times 0,326P_V = 0,978P_V$.

A região “b” na capacidade máxima. Usando (4.1) e (4.2), $P_{D_b} = (0,978 - 0)/(0,326/\lambda) = 1,2P_v$, implicando em interferência na ERB C de média $E\{I\} = (0,326/\lambda)P_{D_b} = 0,978P_V$.

A região “c” vazia implicando em interferência na ERB C de média $E\{I\} = 0$.

A região “d” na capacidade máxima, um usuário de voz com P_V e 4 de dados com $P_{D_c} = (0,978 - 0,326)/[(0,326/\lambda) \times 4] = 0,20P_V$ implicando em interferência na ERB C de média $E\{I\} = 0,326P_V + (0,326/\lambda)4 \times P_{D_c} = 0,978P_V$.

A região “e” com apenas um usuário de voz com P_V , implicando em interferência na ERB C de média $E\{I\} = 0,326P_V$.

A região “f” vazia, implicando em interferência na ERB C de média $E\{I\} = 0$.

Logo, a média da interferência total na ERB ao centro, originada na célula, será a soma das médias geradas em cada região $E\{I_C\} = 3,26P_V$. Temos por (3.36) que o máximo suportado é $E\{I_{C_{\max}}\} = 5,87P_V$, podemos, então, ter um acréscimo de $E\{I_{C_{\max}}\} - E\{I_C\} = 2,61P_V$. Portanto, as regiões com usuários de dados, podem ter aumentada a interferência nelas originadas.

Usando (4.4), a potência do usuário de dados da região “b” terá um acréscimo de

$$\Delta P_{D_b} = \frac{2,61P_V}{\frac{0,326}{0,4} \times 2 \times 1} = 1,60P_V \rightarrow P_{D_b} = 2,80P_V$$

Da mesma forma a potência de cada usuário de dados da região “d” terá um acréscimo de

$$\Delta P_{D_b} = \frac{2,61P_V}{\frac{0,326}{0,4} \times 2 \times 4} = 0,40P_V \rightarrow P_{D_b} = 0,60P_V$$

A interferência causada por esta região na ERB ao centro será :

Região “b” $E\{I\} = (0,326/\lambda) \times 2,80P_V = 2,28P_V$

Região “d” $E\{I\} = 0,326P_V + (0,326/\lambda) \times 4 \times 0,60P_V = 2,28P_V$

A interferência total na ERB, originada na célula, será $E\{I_C\} = 5,864P_V$ que é muito próximo ao máximo suportado de $E\{I_{C_{\max}}\} = 5,87P_V$, como queríamos.

Os usuários das regiões “b” e “d” irão ultrapassar seus limites de gerar interferência nas ERBs adjacentes. Usando a expressão (4.5) verificamos se estas ERBs comportarão este aumento. Para o caso do usuário de dados na região “b” calculamos a interferência que ele causará na ERB mais próxima, antes e depois da otimização na célula. Usando a Tab. 3.6 para o valor de $E\{I_{1,0,f}\}$, a média da interferência passará de

$$\frac{0,108}{0,4} \times 1,2P_V = 0,32P_V$$

para

$$\frac{0,108}{0,4} \times 2,8P_V = 0,76P_V$$

Contudo se esta ERB estiver operando com menos interferência que o máximo suportado, ela poderá comportar este aumento.

Como exemplo, suponhamos que esta ERB esta com interferência total chegando nela igual a $E\{I\} = 11P_V$. Lembramos que o máximo suportado é $E\{I_{\max}\} = 12,46P_V$. A ERB mais próxima a esta região é a ERB_{1,0,f}. A interferência de um usuário de dados nesta ERB é $E\{I_{1,0,f}\}/\lambda$. $E\{I_{1,0,f}\}$ é dado na Tab. 3.6. Usaremos (4.5) para saber o maior acréscimo de potência que pode ser atribuído a este usuário de dados, de forma que a interferência seja aceitável por esta ERB, temos

$$\Delta P_{D_{\max}} = \frac{(12,46P_V - 11P_V) / \frac{0,108}{0,4}}{2 \times 1} = 2,7P_V$$

Observamos que este limite superior é maior que o acréscimo permitido pela ERB ao centro, que foi $\Delta P_{D_b} = 1,60P_V$. Portanto podemos aumentar a potência deste usuário em $1,60P_V$. Teríamos que fazer este cálculo para todas as ERBs da primeira e segunda camada, e escolher o menor acréscimo máximo como o limite.

Capítulo 5

Resultados numéricos

5.1 Sistema para usuários de voz

Neste capítulo iremos comparar os resultados obtidos nos capítulos anteriores com os encontrados na literatura. Obviamente devemos escolher os mesmos parâmetros iniciais, como desvio padrão do sombreadamento, expoente da perda de propagação, taxa de transmissão de bits, desvio padrão do erro de controle de potência.

No capítulo 3 desenvolvemos alguns cálculos para obter a média e a variância da interferência proveniente das demais células do sistema, pois no capítulo 2 apenas consideramos a interferência gerada no interior da célula. Com nossos resultados da média e da variância calcularemos a probabilidade de perda de desempenho, usando (3.35), e compararemos com os resultados obtidos por Corraza [1]. Como ele usou parâmetros diferentes dos nossos, teremos que recalcular a média e variância da interferência. Ele também usou setorização de 120° e portanto teremos que dividir a média e a variância por três.

Consideramos os seguintes parâmetros : desvio padrão do sombreadamento $\sigma_s = 8$ dB, controle ideal de potência, expoente da perda de propagação $\beta = 4$, fator de atividade de voz $\lambda = 3/8$. Usando os cálculos desenvolvidos no capítulo 3 encontramos que a média da interferência $E\{I\} = 0,633n_V P_V/3$ e variância da interferência $\sigma_I^2 = 0,445n_V P_V^2/3$. Com estes valores calculamos a probabilidade de perda de desempenho variando o número de usuários por célula, n_V . Usamos ainda banda de transmissão de $W = 1,25$ MHz, taxa de transmissão $r_V = 8000$ bits/s, limiar inferior de relação sinal ruído $\gamma = 7$ dB. Traçamos estes resultados na Fig. 5.1 e comparamos com o resultado de Corraza mostrado na Fig. 5.2. Podemos observar que as curvas são muito próximas.

Em nosso cálculo consideramos os usuários uniformemente distribuídos em cada região triangular das células, portanto cada célula tem um número constante de usuários. Corraza considerou os usuários uniformemente distribuídos no plano, implicando, segundo Papoulis [8], que o número de usuários numa região ou célula tende a ser Poissoniano com parâmetro λ igual ao número médio de usuários por célula. Consideramos um número fixo de usuários por célula e obtivemos resultados muito próximos. Não achamos conveniente que o número de usuários por célula seja considerado Poissoniano, pois como mostramos no capítulo 3 a célula

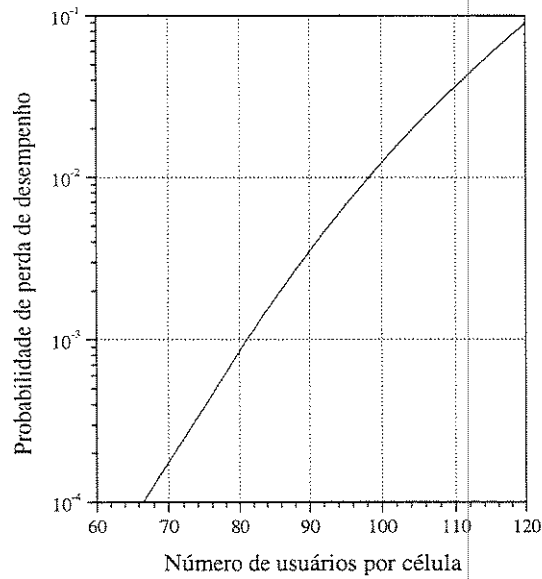


Figura 5.1: Perda de desempenho versus número de usuários por célula, para $\sigma_s = 8$ dB, $\lambda = 3/8$, $\gamma = 7$ dB, $\beta = 4$, $W = 1,25$ MHz, $r_V = 8$ kbits/s, e controle ideal de potência.

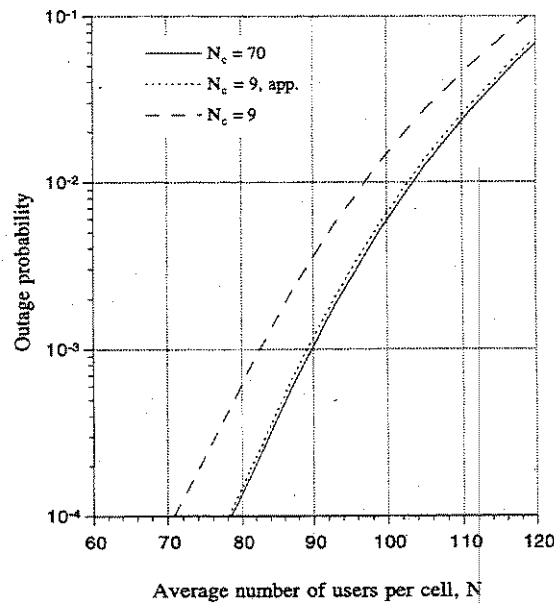


Fig. 11. Outage probability as a function of the number of users per cell N . Comparison of bounding technique for $N_c = 9$ and 70 and approximation for $N_c = 9$ ($\sigma_s = 8.0$ dB, $\xi = 7$ dB, $\gamma = 4$, 120° sectorization, and voice activity factor $= 3/8$).

Figura 5.2: Gráfico extraído do trabalho de Corraza. Onde N_c é o número de ERBs que o móvel monitora a atenuação do canal.

tem um limite de usuários que pode atender. Considerando a distribuição Poissoniana tem-se a possibilidade de extrapolar este limite, o que não irá ocorrer na prática, pois os usuários serão rejeitados pelo sistema. Podemos comparar esta situação com o que acontece num banco com um sistema de fila única com várias caixas de atendimento. O número de clientes na fila tem distribuição Poissoniana, mas o número de clientes nos caixas não tem distribuição Poissoniana, pois os clientes têm de esperar na fila já que o número de caixas é limitado. O número de usuários na célula é Poissoniano quando o sistema estiver operando bem abaixo de sua capacidade, analogamente o número de clientes nos caixas será Poissoniano quando não houver fila no banco. Como estamos calculando a capacidade máxima do sistema não achamos conveniente a consideração da distribuição Poissoniana.

Corraza modelou a interferência como sendo de distribuição chi-quadrada, enquanto em nosso trabalho consideramos uma distribuição log-normal, pois o sinal de cada usuário na ERB sofre sombreamento que é modelado por uma VA log-normal, e o somatório de VA log-normais tende a ser também uma VA log-normal [6]. Na Fig. 5.3 traçamos as distribuições : log-normal, chi-quadrada e também a Gaussiana, usada por Gilhousen em [2]. Traçamos todas com a mesma média e variância. Notamos que as três curvas são muito próximas. Consideramos as células com capacidade máxima de 98 usuários. Conforme Fig. 5.1, com 98 usuários a probabilidade de perda de desempenho é de 1%. Com um grande número de usuários no sistema, a interferência tende a ser Gaussiana pelo teorema central do limite, e é natural que as três curvas sejam muito próximas. Como nosso objetivo é analisar a perda de desempenho na capacidade máxima do sistema, qualquer uma das distribuições serve. Para calcular a probabilidade de perda de desempenho no sistema com controle ideal de potência bastamos integrar a cauda da FDP a partir do ponto indicado na Fig. 5.3. Na Fig. 5.4 traçamos a mesma curva para o sistema com 12 usuários. Podemos observar que as distribuições são bastante diferentes, pois não vale mais o teorema central do limite. Na Fig. 5.5 traçamos a probabilidade de perda de desempenho usando as distribuições chi-quadrada, log-normal e Gaussiana. Observamos que quando o sistema estiver com poucos usuários temos grandes diferenças na probabilidade de perda de desempenho dependendo da FDP considerada. Já quando o sistema estiver operando perto da capacidade máxima as curvas convergem para uma só. Concluimos que no cálculo da capacidade máxima do sistema se pode usar qualquer uma das FDP citadas. Muitos autores injustamente criticaram Gilhousen em [2] por ter utilizado uma FDP Gaussiana e portanto obtido resultados otimistas no cálculo da capacidade do sistema.

Para analisar a influência do algoritmo de controle de potência traçamos na Fig. 5.6 as curvas de perda desempenho variando o desvio padrão do controle de potência, desde o controle de potência ideal ($\sigma_{cp} = 0$ dB) até $\sigma_{cp} = 4$ dB. Observamos que a capacidade do sistema aumenta em torno de 30 usuários por célula para cada 1 dB de melhoria no desvio padrão do erro no controle de potência, para probabilidade de perda de desempenho de 1%. Portanto é crucial um bom algoritmo de controle de potência.

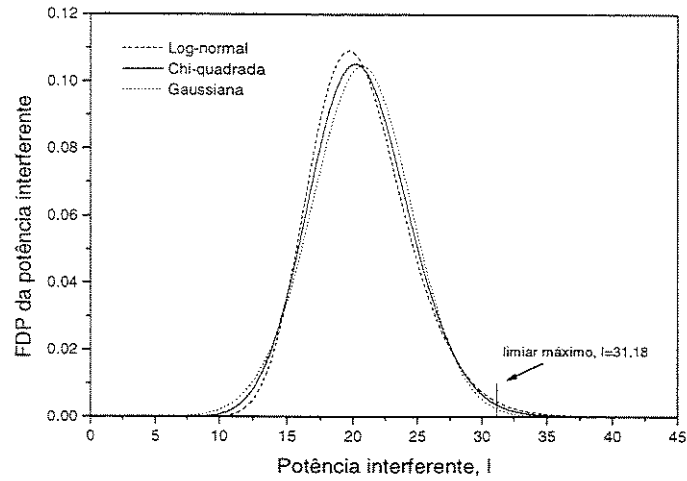


Figura 5.3: Comparação entre as FDPs para a interferência : Log-normal, chi-quadrada e Gaussiana. Para um sistema operando na capacidade máxima, com 98 usuários por célula.

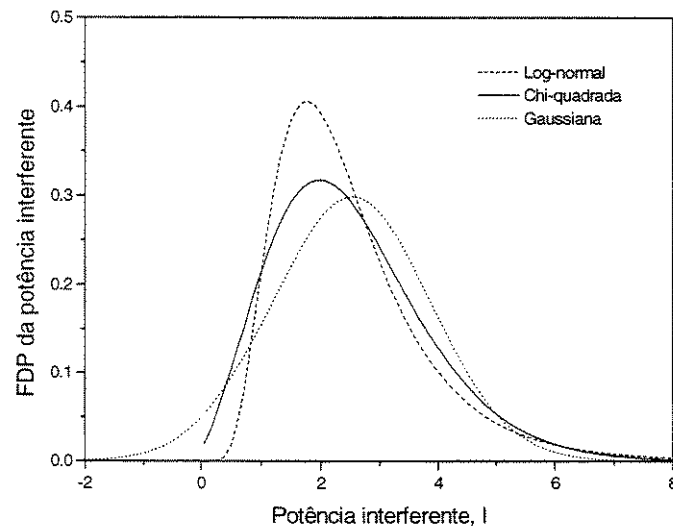


Figura 5.4: Comparação entre as FDPs para a interferência : Log-normal, chi-quadrada e Gaussiana. Para um sistema operando com apenas 12 usuários por célula.

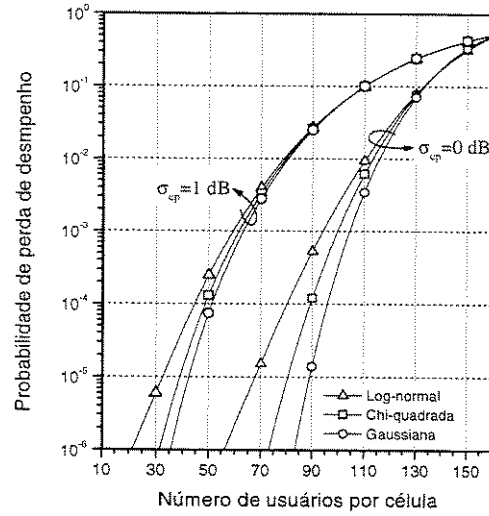


Figura 5.5: Comparação da probabilidade de perda de desempenho para diferentes FDPs de modelamento da interferência : Log-normal, chi-quadrada e Gaussiana. Parametrizado pelo desvio padrão do erro no controle de potência, $\sigma_{cp} = 0$ dB e $\sigma_{cp} = 1$ dB, para $\sigma_s = 6$ dB, $\beta = 4$, $\gamma = 7$ dB, $W = 1,25$ MHz, $r = 8$ kbits/s, $\lambda = 3/8$ e setorização de 120° .

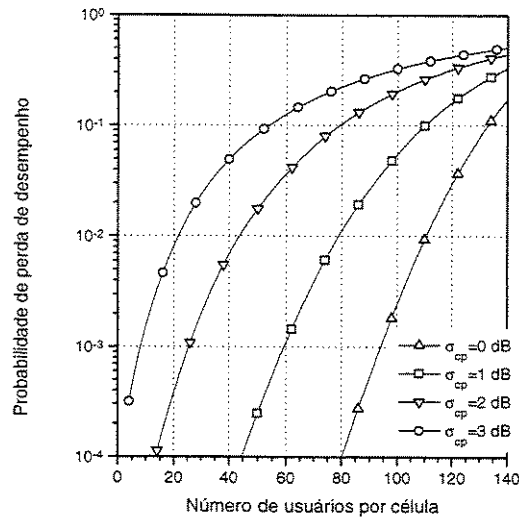


Figura 5.6: Análise da probabilidade de perda de desempenho parametrizado pelo desvio padrão do erro no controle de potência, σ_{cp} , para $\sigma_s = 6$ dB, $\lambda = 3/8$, $\gamma = 7$ dB, $\beta = 4$, $r = 8$ kbits/s, $W = 1,25$ MHz e setorização de 120° .

5.2 Sistema multimídia

Na análise da capacidade de transmissão do sistema multimídia que fizemos no capítulo 4, nossos parâmetros foram conservativos, além de não considerarmos setorização, que multiplica a capacidade do sistema por 3. Portanto a capacidade máxima obtida foi baixa, de forma que o critério proposto para atribuir potência aos usuários de dados apresentou pouco aumento na taxa de transmissão, especialmente no sistema equilibrado, no qual se tem bastante simplicidade no algoritmo de controle de potência. Apenas transfere-se potência dos usuários de voz para usuários de dados em uma mesma região triangular, não afetando, assim, o restante do sistema. Para um sistema com os parâmetros da Fig. 5.6, $\sigma_s = 6$ dB, $\lambda = 3/8$, $\gamma = 7$ dB, $\beta = 4$, $W = 1,25$ MHz, $r_V = 8$ kbits/s, setorização de 120° e erro no controle de potência de $\sigma_{cp} = 1$ dB, a capacidade é de aproximadamente 78 usuários por célula conforme mostra a Fig. 5.6, para perda de desempenho de 10^{-2} , implicando em até 13 usuários por região triangular. Aplicando estes parâmetros à teoria desenvolvida no capítulo 3, chegamos que a interferência gerada por um usuário na região triangular na ERB ao centro, tem média $E\{I\} = 0,334P_V$, logo estes 13 usuários geram interferência na ERB central com média 4,34. Um usuário de dados nesta mesma região gera na ERB interferência de média $E\{I\} = 0,890P_D$. Atribuiremos potência aos usuários de dados de forma que a média da interferência gerada por todos os usuários da região triangular seja a mesma gerada por 13 usuários de voz nesta região, que é a capacidade do sistema. Logo, tem-se

$$0,334P_V n_V + 0,89P_D n_D = 4,34P_V$$

Como mostramos no capítulo 4, a taxa de transmissão de bits destes usuários será

$$r_D = \frac{P_D}{P_V} r_V$$

Na Fig. 5.7 traçamos a taxa de transmissão dos usuários de dados localizados em uma região triangular, em função do número de usuários de voz em cada setor. Parametrizamos para 1, 2 e 3 usuários de dados na região. Observamos que quando o sistema está com poucos usuários de voz, conseguimos altas taxas de transmissão, em torno de 40 kbits/s.

Para confirmar a probabilidade de perda de desempenho do sistema proposto consideramos que todas as regiões triangulares do sistema têm o mesmo número de usuários de dados e de voz. Na Fig. 5.8 traçamos a curva da probabilidade de perda de desempenho do mesmo sistema. Verificamos que a probabilidade de perda de desempenho não varia com o número de usuários de dados, pois juntos eles geram interferência com mesma média e variância. Notamos que quando o sistema tem menos usuários de voz esta probabilidade é menor. Gostaríamos que a curva se mantivesse constante em 1%. Usamos o critério de manter a média da interferência constante. Como a variância diminui à medida que se tem menos usuários de voz no sistema, tem-se um pequeno decréscimo na probabilidade de perda de desempenho. Na Fig. 5.9 traçamos a FDP da interferência do sistema só com usuários de voz e só com

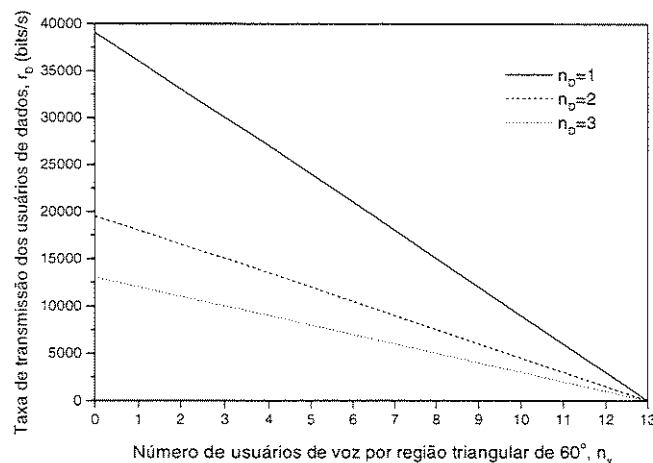


Figura 5.7: Taxa de transmissão dos usuários de dados em uma região triangular de 60° , em função do número de usuários de voz nesta região. Parametrizado pelo número de usuários de dados, para $\sigma_s = 6$ dB, $\lambda = 3/8$, $\gamma = 7$ dB, $\beta = 4$, $r = 8$ kbits/s, setorização de 120° e $\sigma_{cp} = 1$ dB.

usuários de dados. Podemos observar que apesar das médias serem próximas, tem-se maior variância quando há somente usuários de voz, implicando em uma diferença na probabilidade de perda de desempenho. Pode-se propor um aumento na média da interferência à medida que diminui a variância, contudo tem-se que tomar cuidado com a interferência gerada nas ERBs vizinhas.

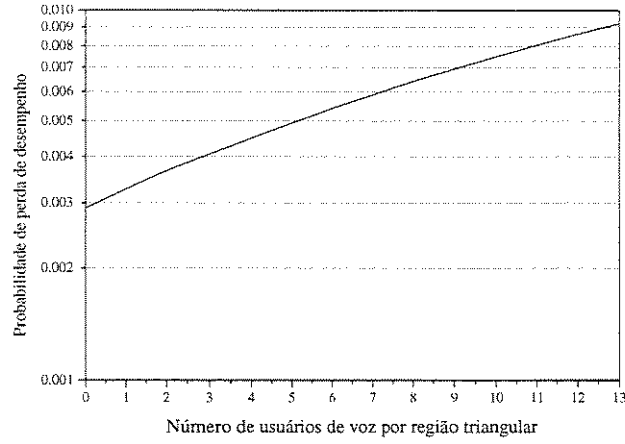


Figura 5.8: Probabilidade de perda de desempenho em função do número de usuários de voz por região triangular de 60° , e apenas um usuário de dados na região, para $\sigma_s = 6$ dB, $\lambda = 3/8$, $\gamma = 7$ dB, $\beta = 4$, $r = 8$ kbits/s, setorização de 120° e $\sigma_{cp} = 1$ dB.

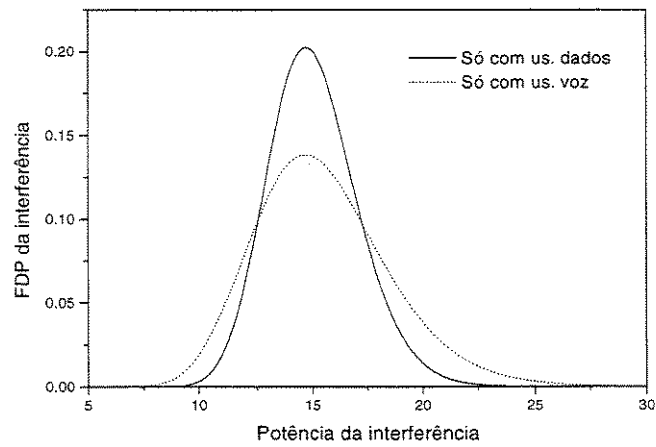


Figura 5.9: Comparação das FDPs da interferência quando há somente usuários de dados no sistema, e quando há somente usuários de voz.

Capítulo 6

Conclusão

Neste trabalho analisamos a capacidade de um sistema celular multimídia, cujo objetivo é atender aos usuários de voz com uma taxa de transmissão constante e com probabilidade de perda de desempenho inferior a 1%. Quando o sistema não estiver com o maior número possível de usuários de voz alocaremos o recurso sobressalente para usuários de dados, de forma que estes possam transmitir bits em taxas altas, dependendo da disponibilidade do sistema. Analisamos a capacidade no enlace do móvel à ERB, pois este é o mais problemático, devido à necessidade de controle de potência e do não sincronismo dos sinais dos usuários.

No capítulo 2 consideramos um sistema multimídia unicelular de forma que só tivemos interferência interna à célula. Analisamos a probabilidade de perda de desempenho e propusemos valores de potência ótimos para os usuários de dados, bem como para a taxa de transmissão destes usuários. Observamos que conseguimos atender aos usuários de dados com taxas de transmissão da ordem de 50 kbits/s, muito maior a taxa dos usuários de voz.

No capítulo 3 calculamos a interferência das demais células do sistema para usuários de voz. Consideramos sombreamento, de forma que nem sempre a ERB mais próxima ao móvel oferece o canal com menor atenuação. Teve-se, então, a necessidade de monitorar a atenuação dos canais de comunicação a um conjunto de ERBs e escolher aquela oferecesse menor atenuação. Sem este cuidado, ir-se-ia gerar muita interferência nas ERBs vizinhas e o sistema CDMA tornar-se-ia inviável. Neste trabalho escolhemos monitorar um conjunto de 9 ERBs. Este número depende do desvio padrão do sombreamento, pois quanto maior este for, mais ERBs deve-se monitorar. Calculamos que para sombreamento com $\sigma_s = 8$ dB o móvel permanece 96% do tempo conectado a apenas 4 ERBs, achamos que monitorar o canal a apenas 4 ERBs seria suficiente. Calculamos a interferência originada nas camadas ao redor da ERB central e observamos boa precisão considerando apenas as 4 primeiras camadas, 98% da interferência é originada nestas camadas. Neste mesmo capítulo, também propusemos atender a mais usuários em uma célula que sua capacidade, quando as células vizinhas estiverem operando abaixo da capacidade máxima. Observamos a necessidade de analisar a interferência causada nas ERBs mais próximas. Assim, analisamos as ERBs da primeira e segunda camada.

No capítulo 4 usamos os resultados do capítulo 3 em um sistema multimídia análogo ao do

capítulo 2. Propusemos formas de atribuir potência aos usuários de dados, visando maximizar sua taxa de transmissão. Como analisamos um sistema sem setorização, cuja capacidade é baixa, não conseguimos ganhos significativos na taxa de transmissão dos usuários de dados.

No capítulo 5 analisamos os resultados numéricos e comparamos com os existentes na literatura. Observamos que nossos resultados estão em concordância com os de Corraza [1]. Incluímos setorização, traçamos a curva da taxa de transmissão dos usuários de dados e observamos que quando temos poucos usuários de voz podemos atender aos usuários de dados com altas taxas de transmissão. Traçamos, também, a curva da probabilidade de perda de desempenho e verificamos que ela se mantém abaixo de 1%, como queríamos.

Proposta de Trabalhos futuros

- Calcular a capacidade do sistema que aproveite os sinais nas 9 ERBs com um “ maximal ratio combiner ” (MRC). Como se tem que monitorar o sinal do móvel em 9 ERBs e depois selecionar a de maior potência, sugerimos usar um MRC [9] (pg.779), obtendo, desta forma, um maior ganho de diversidade. Com processamento dos sinais aproveita-se os 9 sinais em vez de apenas selecionar o mais forte, pode-se, assim, aumentar a capacidade do sistema. Lembramos que a implementação de um
- Considerar que o móvel pode se comunicar com apenas 3 ou 4 ERBs e calcular a capacidade do sistema.
- Considerar regiões de 120° ao invés de 60° .

Bibliografia

- [1] E. G. Corraza , “CDMA cellular systems performance with fading, shadowing and imperfect power control”, IEEE Trans. Vehicular Technologies. vol. 47, no. 2, pp.450-459, May 1998.
- [2] K.S. Gilhousen, I.M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. Weaver and C. E. Weatley III, “ On the capacity of a cellular CDMA system ”, IEEE Transactions on Vehicular Technology vol. 40, no. 2, May 1991
- [3] Celso de Almeida, Roger Pierre Fabris Hoefel, “On the Interference of Cellular CDMA Systems ”, IEEE International Telecommunications Symposium, vol. I, pp. 166-171, 1998 São Paulo
- [4] Roger Hoefel e Celso de Almeida, “The fading effects on the CDMA/PRMA network performance ”, VTC, spring 1999, Houston, USA
- [5] P. T. Brady, “ A statistical analysis of on-off patterns in 16 conversations”, Bell System Technology Journal, vol. 47, pp. 73-91, Jan. 1968.
- [6] L. F. Fenton “The sum of a log-normal probability distribution in a scattered transmission system”, IRE Trans.,vol.C5-8,pp. 56-67, Mar. 1960.
- [7] Celso de Almeida “Tese de livre docência ” UNICAMP pg. 18.
- [8] A. Papoulis, “Probability, random variables, and stochastic processes ”, Second Edition, McGraw-Hill
- [9] J. G. Proakis, “ Digital Communications ”, Third edition, McGraw-Hill
- [10] S. Abeta, S. Sampei and N. Morinaga, “ Adaptive coding rate and process gain control with channel activation for multi-media DS/CDMA systems”, IEICE Trans. Commun., vol. E80-B, no.4 April 1997.