

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES E
CONTROLE
ÁREA DE SISTEMAS ELETRÔNICOS

**ANÁLISE DE SISTEMAS DS/CDMA
DE MÚLTIPLA TAXA**

Cyro Scarano Hemsí

SÃO PAULO

Março/2000

Cyro Scarano Hemsí

**ANÁLISE DE SISTEMAS DS/CDMA
DE MÚLTIPLA TAXA**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Área de Concentração:
Sistemas Eletrônicos**

**Orientador:
Prof. Dr. Paul Jean Etienne Jeszensky**

SÃO PAULO

Março/2000

Hemsi, Cyro Scarano

Análise de Sistemas DS/CDMA de Múltipla Taxa
São Paulo, março de 2000
pp. 247

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle – Área de
Sistemas Eletrônicos.

1. Telefonia Celular, 2. CDMA, 3. Múltipla taxa, 4. Terceira Geração,
5. Multimídia

Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações
e Controle – Área de Sistemas Eletrônicos.

Dedicatória

Para:

Meus pais e meu irmão, minhas tias Salua e Julita, minha família,
Andrea Décourt, meus amigos e professores.

Agradecimentos

Ao Professor Paul Jean, pela orientação e apoio, indispensáveis para o sonho e construção desse trabalho;

Aos Profs. Drs. Denise Consonni e Max Gerken, pelas importantes sugestões;

Aos Profs. Drs. José Sidnei Colombo Martini e Paulo Sérgio da Silva;

À Promon Eletrônica Ltda.

Índice

Lista de Abreviaturas	viii
Lista de Figuras e Gráficos	ix
Lista de Tabelas	xiii
Resumo	xiv
“Abstract”	xvi
1. Introdução	1.1
1.1 Classes de Serviço em Ambiente Multimídia	1.2
1.2 Esquemas de Multi-taxas em DS/CDMA	1.4
1.3 Modo de Transmissão “Scheduling”	1.7
2. Capacidade em Sistemas CDMA Multi-taxas	2.1
2.1 Modelagem de Capacidade	2.3
2.2 Critério de Otimização de Potência Total Mínima	2.10
2.3 Critério de Otimização de Taxa Total Máxima	2.18
2.4 Aproximação usando Programação Linear	2.20
2.5 Resultados Numéricos	2.26
3. Maximização de “Throughput” e “Scheduling” em Sistemas CDMA Multi-taxas Ideais	3.1
3.1 Modelagem	3.4
3.2 Cálculo da Taxa Máxima de Classe 2, Convencional	3.10
3.3 Cálculo da Taxa Máxima de Classe 2, “Scheduling”	3.14
3.4 Resultados Numéricos	3.22
4. Maximização de “Throughput” e “Scheduling” em Sistemas CDMA Multi-taxas com Controle Imperfeito de Potência	4.1

4.1 Modelagem dos E_b/I_0 requeridos	4.5
4.2 Modelagem da Variável aleatória “V”	4.10
4.3 Resultados Numéricos	4.27
5. Maximização de “Throughput” e “Scheduling” em Sistemas CDMA Multi-taxas Multi-celulares e com Limitação das Potências Máximas de Transmissão	5.1
5.1 Cálculo da Interferência Externa	5.10
5.2 Modelagem do Caso Multi-celular	5.15
5.3 Resultados Numéricos	5.24
5.4 Limitação das Distâncias	5.30
6. Detecção Multi-usuário em Sistemas CDMA Multi-taxas	6.1
6.1 Modelagem dos Esquemas Convencional e SIC com Classe Única	6.9
6.2 Resultados Numéricos – Classe Única	6.24
6.3 Comparação SIC e “Scheduling” – Classe Única	6.28
6.4 Resultados Numéricos da Comparação com Classe Única	6.35
6.5 Modelagem Esquemas Convencional, “Scheduling” e SIC “Dual Class”	6.42
6.6 Resultados Numéricos com “Dual Class”	6.47
7. Conclusões e Trabalhos Futuros	7.1
8. Referências Bibliográficas	8.1
9. Anexos	9.1

Lista de Abreviaturas

AMPS: Advanced Mobile Personal System

AWGN: Additive White Gaussian Noise

BER: Bit Error Rate

BPSK: Binary Phase Shift Keying

CBR: Constant Bit Rate

CDMA: Code Division Multiple Access

DS/CDMA: Direct Sequence Code Division Multiple Access

ERP: Effective Radiated Power

FER: Frame Error Rate

GP: Ganho de Processamento

IC: Interference Cancellation

MAI: Multi-Access Interference

MUD: Multi-User Detection

PIC: Parallel Interference Cancellation

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

QoS: Quality of Service

SIC: Successive Interference Cancellation

SIR: Signal to Interference Ratio

TDMA: Time Division Multiple Access

UMTS: Universal Mobile Telecommunications Systems

VA: Variável Aleatória

VBR: Variable Bit Rate

VSG-CDMA: Variable Spreading Gain Code Division Multiple Access

Lista de Figuras e Gráficos

Figura 2.1: Representação gráfica da região de soluções para dois usuários

Figura 2.2: Solução de Mínima Potência Total para dois usuários

Gráfico 2.1: Capacidade do sistema multi-taxas, sem limitação de potência

Gráfico 2.2: Capacidade do sistema multi-taxas com limitação de potência e $\eta_0=10^{-6}$

Gráfico 2.3: Capacidade do sistema multi-taxas com limitação de potência e $\eta_0=10^{-7}$

Gráfico 2.4: “Throughput” total em função da Taxa Mínima de Dados

Gráfico 3.1: “Throughputs” (em kbps) obtidos para $N_1=15$ no sistema ideal

Gráfico 3.2: Ganho obtido para $N_1=15$ no sistema ideal

Gráfico 3.3: “Throughputs” (em kbps) obtidos para $N_1=8$ no sistema ideal

Gráfico 3.4: Ganho obtido para $N_1=8$ no sistema ideal

Gráfico 3.5: “Throughputs” (em kbps) obtidos para $N_1=1$ no sistema ideal

Gráfico 3.6: Ganho obtido para $N_1=1$ no sistema ideal

Gráfico 3.7: Ganhos obtidos para $N_1=8$, diversos valores de R_0 , e sistema ideal

Gráfico 3.8: Limites Máximos de R_0 (em kbps) para que $T \geq R_2$

Gráfico 3.9: “Throughput” Total (em kbps)

Gráfico 3.10: Potências P_2 instantâneas e médias, normalizadas pela ocupação de cada configuração

Gráfico 4.1: Funções G do método de Schwartz & Yeh

Gráfico 4.2: Desvio da variável T em função de σ

Gráfico 4.3: Valores de desvio calculados e simulados, $\sigma=0,5$ dB

Gráfico 4.4: Valores de desvio calculados e simulados, $\sigma=2$ dB

Gráfico 4.5: Valores de desvio calculados e simulados, $\sigma=4$ dB

Gráfico 4.6: “Throughputs” (em kbps) obtidos para $N_1=15$ e controle imperfeito de potência

Gráfico 4.7: Ganhos obtidos para $N_1=15$ e controle imperfeito de potência

Gráfico 4.8: “Throughputs” (em kbps) obtidos para $N_1=8$ e controle imperfeito de potência

Gráfico 4.9: Ganhos obtidos para $N_1=8$ e controle imperfeito de potência

Gráfico 4.10: “Throughputs” (em kbps) obtidos para $N_1=3$ e controle imperfeito de potência

Gráfico 4.11: Ganhos obtidos para $N_1=3$ e controle imperfeito de potência

Figura 5.1: Geometria para cálculo da interferência inter-células

Figura 5.2: Configuração multi-celular

Gráfico 5.1: Fator f de interferência externa

Gráfico 5.2: “Throughputs” (em kbps) obtidos para $N_1=15$ e multi-células

Gráfico 5.3: Ganhos obtidos para $N_1=15$ e multi-células

Gráfico 5.4: “Throughputs” (em kbps) obtidos para $N_1=8$ e multi-células

Gráfico 5.5: Ganhos obtidos para $N_1=8$ e multi-células

Gráfico 5.6: “Throughputs” (em kbps) obtidos para $N_1=3$ e multi-células

Gráfico 5.7: Ganhos obtidos para $N_1=3$ e multi-células

Gráfico 5.8: Ganhos obtidos para $N_1=13$ e multi-células

Gráfico 5.9: Limitações para ganho de “scheduling” – ruído relativo

Gráfico 5.10: Limitações para ganho de “scheduling” – taxa de sincronismo (em kbps)

Figura 5.3: Distribuição de classes no caso de distâncias limitadas

Gráfico 5.11: Ganhos para $N_1=13$ com potências e distâncias limitadas

Figura 6.1: Algoritmo de detecção SIC

Figura 6.2: Diagrama em blocos do detector SIC

Gráfico 6.1: Densidades de probabilidades dos móveis ordenados segundo potências

Gráfico 6.2: Números máximos de usuários com SIC e detecção convencional

Gráfico 6.3: “Throughputs” (em kbps) obtidos para SIC e detecção convencional

Gráfico 6.4: Ganhos obtidos com SIC

Gráfico 6.5: Ganhos obtidos com SIC e “scheduling”

Gráfico 6.6: “Throughputs” (em kbps) para modos SIC, “scheduling” e convencional
(calculado segundo duas modelagens)

Gráfico 6.7: Comparação entre SIC, “scheduling” e “scheduling de pior caso” para $\eta=0,05$

Gráfico 6.8: Comparação entre SIC, “scheduling” e “scheduling de pior caso” para $\eta=0,02$

Gráfico 6.9: Comparação entre SIC e esquema convencional para duas classes de usuários e $N_1=3$

Gráfico 6.10: Comparação entre SIC e esquema convencional para duas classes de usuários e $N_1=8$

Gráfico 6.11: Comparação entre SIC e “scheduling” para duas classes de usuários e $N_1=3$

Gráfico 6.12: Comparação entre SIC e “scheduling” para duas classes de usuários e $N_1=8$

Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Classes de serviços para sistemas “wireless” de terceira geração

Tabela 1.2: Especificações do IMT-2000

Tabela 2.1: Especificações para o caso sem limitação de potência

Tabela 2.2: Especificações para o caso com limitação de potência

Tabela 3.1: Especificações para o Sistema Ideal

Tabela 4.1: Especificações para Sistema com Controle Imperfeito de Potência

Tabela 5.1: Especificações para o caso com limitação de potência

Tabela 6.1: Ganhos em “Throughput” devido ao SIC

Tabela 6.2: Comparação entre SIC e “scheduling” para $\eta=0,05$

Tabela 6.3: Comparação entre SIC e “scheduling” de pior caso” para $\eta=0,05$

Tabela 6.4: Comparação entre SIC e “scheduling” para $\eta=0,02$

Tabela 6.5: Comparação entre SIC e “scheduling” de pior caso” para $\eta=0,02$

Resumo

O objetivo deste trabalho é estudar sistemas DS/CDMA de múltipla taxa, uma importante tecnologia de acesso para a terceira geração de sistemas de comunicações móveis, cujas especificações vem sendo intensamente discutidas no Brasil e internacionalmente. O trabalho enfoca os aspectos de capacidade e otimização de recursos em sistemas DS/CDMA multi-taxas. A partir das especificações de taxas mínimas de bits, qualidades mínimas de serviço (QoS) e potências máximas de transmissão de todos os usuários de uma célula multi-classes, determina-se uma expressão de capacidade máxima do sistema, que pode ser otimizada segundo critérios de interesse. O primeiro critério escolhido visa obter a mínima potência total de transmissão necessária para suportar uma determinada configuração de usuários, primeiramente, para uma célula isolada, em seguida, para o caso multi-celular. O segundo critério de otimização estudado objetiva maximizar a taxa total obtida (ou “throughput” total) pelo sistema multi-taxas para uma determinada configuração de usuários, também nos ambientes de célula isolada e multi-células.

Alternativamente, o trabalho estuda uma proposta de modificação no esquema de transmissão dos sistemas CDMA multi-taxas convencionais (sistemas com detecção “single-user” e transmissão simultânea de todos os usuários), que propõe separar no tempo os sinais dos usuários de serviços pouco sensíveis a atraso. Esse esquema, denominado “scheduling”, permite, da mesma forma que o sistema convencional, maximização de “throughput”, que será comparada aos resultados anteriores. Os ganhos de capacidade obtidos com o “scheduling”

ainda serão comparados àqueles resultantes de um esquema de detecção “multi-user” do tipo SIC (cancelamento sucessivo de interferência), modelado no capítulo final.

“Abstract”

The objective of this work is to study multi-rate DS/CDMA systems, an important access technology for the third generation mobile systems, which specifications have been discussed internationally.

The work focuses on capacity and resource optimization aspects of this system. From user specifications, as maximum transmission power and minimum rate and quality of service (QoS) requirements in a multi-class environment, a capacity expression is derived, which can be optimized to result the minimum total transmission power solution or the maximum total throughput one, as was investigated, initially for a single cell, next for multi-cell environment.

Furthermore, the work studies a modification in the multi-rate CDMA transmission scheme (single-user detection with all users transmitting at same time) that proposes to time schedule the signals of delay-tolerant users and also maximize their rates in this situation, resulting throughput gains, when compared with the conventional transmission mode. These throughput gains were also compared with the ones obtained with SIC (successive interference cancellation) multi-user approach, which was also modelled in this work.

1.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicação móvel existentes foram projetados para suportar serviços de voz, podendo acomodar dados a baixas taxas e mensagens curtas [Jesz99].

Para os sistemas “wireless” futuros, a voz continuará a ser a principal aplicação, mas o projeto deverá contemplar tráfego multimídia. Mesmo no caso da voz, espera-se uma qualidade de serviço superior e, ainda, a possibilidade de transmiti-la junto com vídeo. Outros serviços esperados são a transmissão de dados, ou seja, imagens (“facsimile”), com alta definição, o acesso a redes de dados e internet (computação “wireless”).

Essas novas fontes de tráfego, com seus requisitos de taxa e qualidade de serviço, impõem que os sistemas “wireless” de terceira geração estejam preparados para acomodar tráfego multi-taxas e taxas elevadas de forma confiável. O desempenho desses sistemas, em relação aos atuais, também deve ser melhorado, tanto em termos de capacidade como em consumo de potência.

Nesta introdução descreveremos as principais classes de serviço em ambiente “wireless” de terceira geração, em seguida os esquemas para implementar multi-taxas em CDMA e, por fim, a técnica de “scheduling”, que visa a melhorar o desempenho dos sistemas, e será estudada detalhadamente nesse trabalho.

1.1 Classes de Serviço em Ambiente Multimídia

As classes de serviço em ambiente multimídia diferenciam-se pelas seguintes características:

- tipo de serviço, ou seja, CBR (“constant bit rate”) ou VBR (“variable bit rate”), e taxa especificada;
- qualidade de serviço, na forma de BER ou FER;
- tolerância a atraso.

A seguir apresentamos uma visão geral dos serviços a se considerar em futuros sistemas “wireless”, segundo [Rape95], [Kni98a], [Mori97]:

As principais classes de serviços são:

Classe de Serviço	Serviços	Taxa de bits (kbps)	BER máximo	Atraso máximo (ms)	Prioridade por classe de mobilidade		
					mob. alta	mob. baixa	fixo
serviços de voz	voz, audio-conferência	2.4 a 32	10^{-3}	40 (sensível)	- / alta	- / alta	- / alta
serviços de dados a baixas taxas	mensagens, facsimile, e-mail	8 a 64	10^{-4}	200 (insensível)	alta/ média/ média	alta/ média/ alta	alta/ média/ alta
serviços de dados a taxas médias	transferência de arquivos, acesso à Internet	64 a 128	10^{-6}	Insensível	alta/ média	alta/ alta	alta/ alta
vídeo	vídeo de baixa resolução	64 a 128	10^{-6}	Sensível	média	média	média
serviços de dados a altas taxas	acesso redes comutadas e pacotes, vídeo conferência de alta qualidade	100 a 2000	10^{-7}	Insensível	alta/ baixa	alta/ baixa	alta/ baixa
serviços multimídia	voz, dados e vídeo	100 a 2000	10^{-7}	Sensível	média	média	média

Tabela 1.1: Classes de serviços para sistemas “wireless” de terceira geração

A padronização do IMT-2000, sistema celular de terceira geração, prevê os seguintes recursos:

Ambiente	Sensíveis a atraso		Insensíveis a atraso	
	Taxa máxima	BER e atraso máximos	Taxa máxima	BER e tempo de transferência máximos
rural, <i>outdoor</i> , mobilidade alta	144 kbps	10^{-3} a 10^{-7} 20-300 ms	144 kbps	10^{-5} a 10^{-8} 150 ms ou mais
urbano /sub-urbano, <i>outdoor</i> , mobilidade alta	384 kbps	10^{-3} a 10^{-7} 20-300 ms	384 kbps	10^{-5} a 10^{-8} 150 ms ou mais
<i>indoor</i> , mobilidade baixa	2 Mbps	10^{-3} a 10^{-7} 20-300 ms	2 Mbps	10^{-5} a 10^{-8} 150 ms ou mais

Tabela 1.2: Especificações do IMT-2000

Os sistemas de terceira geração, IMT-2000, liderado pela ITU e UMTS, da ETSI, vem sendo amplamente discutidos, tendo como principais propostas para padronização, os sistemas cdma2000 (americano) e WCDMA (europeu). Uma comparação dessas propostas, incluindo, também, as características da interface de segunda geração IS-95 pode ser encontrada em [Ojan98] e [Kni98a]. Referências adicionais sobre o assunto são: [Dahl98], [Fuka96], [Adac98] e [Kni98b].

Como veremos no próximo item, sistemas CDMA multi-taxas podem ser implementados através de multi-modulação, ganho de processamento variável, multi-códigos ou taxas de “chips” variáveis.

1.2 Esquemas de Multi-taxas em DS/CDMA

- Multi-modulação

Nesse esquema, a modulação de cada usuário pode ser selecionada, por exemplo, de BPSK a 64 QAM, em função da taxa de bits necessária. Aproveitam-se as diferentes sensibilidades de recepção de cada técnica de modulação para, variando-se a qualidade de serviço (e, portanto, a taxa máxima), obter-se a mesma probabilidade de erro de bit, [Mori97].

O número de símbolos da constelação de um usuário i , em relação a um usuário padrão, à taxa R_n e utilizando BPSK, vale:

$$M = 2^{R_i/R_n}, i = 1, 2, \dots \quad (1.1)$$

onde R_i é a taxa do i -ésimo usuário.

O ganho de processamento é igual para todos os usuários, e vale:

$$GP = W / R_n \quad (1.2)$$

onde W é a largura de banda ocupada pelos sinais espalhados a uma mesma taxa de “chips”.

- Ganho de Processamento Variável

Nesse esquema, denominado VSG-CDMA (“variable spreading gain”) todos os usuários utilizam modulação BPSK e os ganhos de processamento são dados por:

$$GP = W / R_i \quad (1.3)$$

Todos os usuários ocupam a mesma banda W , utilizam-se taxas de “chips” constantes e um único código de espalhamento por usuário. Os ganhos de processamento variam com as taxas e usuários a taxas elevadas compensam o baixo ganho de processamento transmitindo com potências mais altas.

Os sinais dos usuários são dados por:

$$s_i(t) = \left\{ \sum_m \sqrt{2 \cdot P_i} \cdot b_{i,m} \cdot \left[\sum_{n=1}^{G_i} c_{i,m+n} \cdot h(t - mT_i - nT_c) \right] \right\} \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t) \quad (1.4)$$

onde P_i é a potência do sinal do usuário i , $\{b_i\}$ é a sua sequência de bits, com período T_i e tal que $b_i \in \{-1, 1\}$; o termo $\{c_i\}$ é o i -ésimo código de espalhamento, com período $T_c = 1/f_c$ e tal que $c_i \in \{-1, 1\}$ e $h(t)$ é a função pulso retangular, de largura T_c e amplitude unitária.

$G_i = T_i/T_c$, é o ganho de processamento, ou relação de “chips” por bit, e é variável.

- Multi-códigos

No esquema multi-códigos, a taxa R_i é transmitida através de R_i/R_i^* canais paralelos com códigos ortogonais. R_i^* é a taxa em cada canal e o ganho de processamento de cada usuário, em cada canal, é constante, igual a W/R_i^* .

Os sinais são, portanto:

$$s_i(t) = \sum_{j=1}^M s_i^{(j)}(t) \quad (1.5)$$

onde :

$$s_i^{(j)}(t) = \left\{ \sum_m \sqrt{2 \cdot P_i^*} \cdot b_{i,m}^{(j)} \cdot \left[\sum_{n=1}^{G_i^*} c_{i,m+n} \cdot q_{i,n}^{(j)} \cdot h(t - mT_i^* - nT_c) \right] \right\} \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t)$$

onde $\{q_i\}$ gera os M códigos ortogonais a partir do código $\{c_i\}$, $M = R_i/R_i^* = T_i^*/T_i$ e $G_i^* = T_i^*/T_c = M \cdot G_i$. Escolhe-se M para acomodar a taxa de cada usuário.

Em [Otto95], comparou-se os três esquemas em termos de probabilidades de erro de bit e concluiu-se que os dois últimos são melhores. Os esquemas VSG

e multi-códigos têm praticamente o mesmo desempenho, conforme mostrado também em [Otto95] e em [Ram98a].

- **Taxa de “Chips” Variável**

No esquema VSG-CDMA, cada usuário tem seu ganho de processamento e, portanto, uma eficiência de uso de banda. No esquema multi-códigos, ao contrário, os ganhos de processamento são constantes, o que é desejável. Outra maneira de se obter ganhos de processamento fixos é variar a taxa de “chips” proporcionalmente à de bits, espalhando os sinais em diferentes bandas e multiplexando-os em frequência.

Esse esquema é mais complexo que os dois anteriores e por não ser considerado na maioria das propostas de futuras gerações, também não será nesse trabalho.

Modo de Transmissão “Scheduling”

Como mencionado, os sistemas multi-taxas deverão ter capacidade para atender usuários com requisitos de taxa elevados e probabilidades de erros de bit baixas. Técnicas para aumentar o desempenho de sistemas CDMA têm em comum o princípio de separação ou ortogonalização dos sinais, no tempo ou na frequência, [Kish99].

Nesse trabalho, avaliaremos os ganhos de desempenho que podem ser obtidos através da modificação do “uplink” de sistemas CDMA para o denominado modo de transmissão “scheduling”. O esquema proposto em [Ram98a], corresponde exatamente à separação dos sinais no tempo, através da adaptação de “time slots” ao esquema existente, e tem um correspondente dual na frequência. Cada usuário passa a transmitir apenas em um ou mais “time slots”, pré-definidos de maneira centralizada.

Consideremos um sistema multi-taxas com ganho de processamento variável e sem “scheduling”. O sinal recebido na estação rádio base, em um intervalo $T_i=1/R_i$, tempo de bit do usuário i , é:

$$s = \sqrt{2 \cdot P_i} \cdot b_i \cdot \left[\sum_{n=1}^{G_i} c_{i,n} \right] + \sum_{k=1, k \neq i}^N \sum_{l=1}^{C_k} \left\{ \sqrt{2 \cdot P_k} \cdot b_{k,l} \cdot \left[\sum_{n=1}^{G_k} c_{k,l,n} \right] \right\} + n \quad (1.6)$$

onde G 's são ganhos de processamento, C 's, as relações entre taxas dos demais usuários para o usuário i e n é um ruído *AWGN*. No intervalo considerado, o usuário i está sendo recebido junto com a interferência de múltiplo acesso (MAI) dos demais e ruído.

A idéia básica do “scheduling” é reduzir o termo MAI significativamente, determinando que apenas uma pequena parcela dos usuários transmita simultaneamente, enquanto os demais apenas mantém sincronismo com a rádio base (a idéia de se obter ganhos de capacidade através de redução da

MAI também originou as técnicas de detecção multi-usuários, amplamente estudadas e que serão tratadas no capítulo 6).

Esse tema será desenvolvido nos próximos capítulos, primeiramente modelando-se a capacidade de um sistema multi-taxas (capítulo 2), conforme apresentado em [Samp95]. Em seguida, calcula-se o ganho de desempenho (ou de “throughput” total), obtido através de “scheduling”, para um sistema unicelular e ideal, conforme proposto por [Ram98b], para os casos de controle perfeito (capítulo 3) e imperfeito de potência (capítulo 4), nesse último com algumas considerações diferentes da referência, como será exposto.

No capítulo 5, estendemos os resultados das referências para o caso multicelular e com limitação das potências de transmissão, determinando ganhos de “scheduling” também nessa condição. No capítulo 6, os ganhos de desempenho obtidos através de “scheduling” são comparados, no caso multicelular, aos que se pode obter utilizando-se detecção multi-usuários, em particular, SIC (“successive interference cancellation”). Para isso, estendemos a modelagem de SIC proposta em [Warr98] para o caso multi-classes, em particular “dual-class”, e desenvolvemos uma metodologia para comparação desses esquemas (todos os resultados numéricos foram obtidos utilizando-se o “software” *Mathematica for Windows*). Finalmente, no capítulo 7, apresentamos as conclusões finais do trabalho e sugestões de trabalhos futuros. No item de Anexos, as listagens das rotinas de simulação desenvolvidas e o artigo

“Comparison of Alternatives for Capacity Increase in Multiple-Rate Dual-Class DS/CDMA Systems”, atualmente em processo de submissão.

2.

CAPACIDADE EM SISTEMAS DS/CDMA MULTI-TAXAS

O objetivo inicial deste capítulo é descrever e modelar o problema de capacidade e alocação de recursos em sistemas CDMA multimídia, a partir das especificações de serviço a serem garantidas para cada usuário, tipicamente qualidade de serviço e taxa de bits, conforme apresentado em [Samp95] e [Samp97].

Através dessa modelagem, poderemos determinar se uma configuração de N usuários e respectivas especificações é admissível, ou seja, se resulta numa ocupação viável, para os objetivos de desempenho pré-definidos.

Analisaremos o “uplink” de uma célula isolada, em que N usuários especificam requisitos mínimos de qualidade de serviço e taxa de bits (para usuários de voz, tipo CBR, especificam-se valores fixos de taxa). Podem haver, ainda, valores máximos de potência de transmissão.

O sistema multi-taxas considerado tem taxa de “chip” constante e, portanto, todos os sinais espalhados ocupam uma mesma banda W , com ganhos de processamento variáveis.

Os requisitos de qualidade de serviço (QoS) dos usuários, que tipicamente são especificações de atraso máximo e taxa de erro de bit (BER) ou erro de quadro (FER) máxima, serão representados por expressões de energia de bit por densidade espectral de interferência (E_b/I_0 , ou SIR, relação sinal-interferência). A correspondência entre E_b/I_0 e BER ou FER é direta, dependendo do modelo de receptor utilizado.

Quanto maior o número de estações móveis na célula, a relação E_b/I_0 dos usuários tende a diminuir. O número máximo de usuários está limitado, portanto, por um valor mínimo de E_b/I_0 .

2.1 Modelagem de Capacidade

Sejam o vetor $\Gamma = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N]$, dos E_b/I_0 requeridos para determinados requisitos de QoS, e $\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_N]$, dos valores mínimos de taxa de bits, dependendo do serviço desejado.

Além disso, consideremos que os usuários estão limitados a valores máximos de potência de transmissão, representados pelo vetor $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_N]$. No caso de célula isolada, essa restrição não é necessária, embora a potência média deva estar restrita por limitação das baterias das estações móveis.

Sejam ainda os vetores $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_N]$, das potências de transmissão, e $\mathbf{R} = [R_1, R_2, \dots, R_N]$, das taxas de bits praticadas na célula.

As perdas de percurso, ou de canal, dos usuários serão representadas pelo vetor $\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_N]$ e correspondem às atenuações sofridas pelos sinais nos percursos entre transmissor e receptor e são funções das distâncias e das condições de propagação.

Na condição de célula isolada, sem interferência externa, há apenas ruído de fundo, suposto aditivo, branco e gaussiano, de densidade espectral unilateral de potência η_0 .

A expressão de E_b/I_0 do $i^{\text{ésimo}}$ usuário é:

$$\left(\frac{E_b}{I_0} \right)_i = \frac{W}{R_i} \cdot \frac{h_i \cdot P_i}{\sum_{j \neq i} h_j \cdot P_j + \eta_0 W} \quad (2.1)$$

Essa expressão é imediatamente obtida considerando-se:

$$E_{bi} = \frac{h_i \cdot P_i}{R_i}$$

e:

$$I_{0i} = \frac{\text{Interf. Total}}{W} = \frac{\sum_{j \neq i} h_j \cdot P_j + \eta_0 W}{W}$$

Nas expressões anteriores, observar que, para um dado usuário, a potência interferente total é composta das potências dos demais usuários internos, que constituem uma parcela de interferência do tipo multi-acesso (MAI), e de ruído $AWGN$, presente na banda W . No caso multi-celular, devemos considerar também as interferências externas.

Na relação de E_b/I_0 obtida, leva-se em conta o ganho de processamento do usuário i , W/R_i , característico de sistemas DS-CDMA, além da relação entre as potências própria e as demais.

O problema de alocação de recursos corresponde a atender simultaneamente, para todos os usuários, às seguintes restrições:

Restrições de QoS:

$$\left(\frac{E_b}{I_0} \right)_i = \frac{W}{R_i} \cdot \frac{h_i \cdot P_i}{\sum_{j \neq i} h_j \cdot P_j + \eta_0 W} \geq \gamma_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (2.2)$$

Restrições de potência e taxa:

$$0 < P_i \leq p_i, \quad R_i \geq r_i, \quad i = 1, \dots, N$$

As expressões de QoS podem ser re-escritas, isolando-se as potências recebidas:

$$\frac{h_i \cdot P_i}{\sum_{j \neq i} h_j \cdot P_j + \eta_0 W} = \frac{R_i \cdot (E_b/I_0)_i}{W} \quad (2.3)$$

$$\frac{h_k \cdot P_k}{\sum_{j \neq k} h_j \cdot P_j + \eta_0 W} = \frac{R_k \cdot (E_b/I_0)_k}{W}, \quad k = 1, \dots, N \text{ e } k \neq i$$

Observar que potências de transmissão, taxas de bits e qualidades de serviço são grandezas controláveis, ou seja, podem ser negociadas na alocação de recursos em sistemas multimídia, mas, pelas expressões anteriores, também são dependentes, ou seja, fixadas as taxas de bits e qualidades de serviço, as potências de transmissão necessárias estão fixadas e são únicas.

Na expressão 2.3, os termos do lado direito representam desempenhos, ou seja, o produto de taxas e qualidades, normalizados por W . Podemos observar que um aumento em $h_i P_i$, mantidas as outras potências constantes, permite aumentar o desempenho de i , mas pode impactar no desempenho de um outro usuário k , pois aumenta a interferência multi-acesso para k , como segue:

- supondo que o sistema está em sua capacidade máxima, a elevação da i -ésima potência pode aumentar na mesma proporção o desempenho do usuário i (taxa e QoS), mas implica diminuir os desempenhos de usuários $k \neq i$.

- por outro lado, se o sistema não está totalmente carregado e o usuário i aumenta sua potência, será possível aumentar as potências de outros usuários, mantendo seus desempenhos. Uma nova situação de equilíbrio será alcançada, em que a ocupação e o desempenho total do sistema são maiores. Observar que, nesse caso, houve um substancial aumento da potência total transmitida, que está diretamente ligada ao desempenho. Isso será investigado mais adiante, assim como a capacidade máxima do sistema.

A alocação de recursos, portanto, não pode ser resolvida usuário a usuário, mas conjuntamente, atribuindo-se valores de potência controlados, dependendo dos valores de taxa e QoS. A potência alocada ao usuário i não depende apenas do seu objetivo de desempenho, mas de todas as demais potências e desempenhos, conjuntamente (ou seja, da ocupação do sistema). Esse controle será discutido mais adiante.

Exploraremos uma interpretação gráfica para o problema: no hiper-espço N -dimensional de vetores $[P_1, P_2, \dots, P_N]$, representando as potências a serem alocadas aos N usuários, as $2.N$ especificações (taxa e QoS) definem hiper-planos, um para cada usuário. O vetor de solução de potências corresponde ao ponto de interseção dos N hiper-planos.

Para especificações dadas na forma de requisitos mínimos, tais como:

$$\left(\frac{E_b}{I_0} \right)_i \geq \gamma_i$$

$$R_i \geq r_i$$

cada usuário tem uma região de possíveis soluções no espaço, cada solução correspondendo a uma taxa e QoS. As soluções do sistema estão na área de interseção dessas regiões.

Um caso simples de ser visualizado graficamente é o de dois usuários em uma célula. Cada usuário, em função de seus valores de taxa e qualidade de serviço, pré-definidos, define uma reta no espaço bidimensional de vetores $\mathbf{P} = [P_1, P_2]$. Como os requisitos são do tipo “valor mínimo”, eles delimitam semi-planos de soluções. Além disso, devido às limitações (superior e inferior) de potência de transmissão por usuário, as regiões de soluções anteriores devem estar contidas numa área retangular. A região final de soluções é a interseção das regiões, conforme ilustrado a seguir:

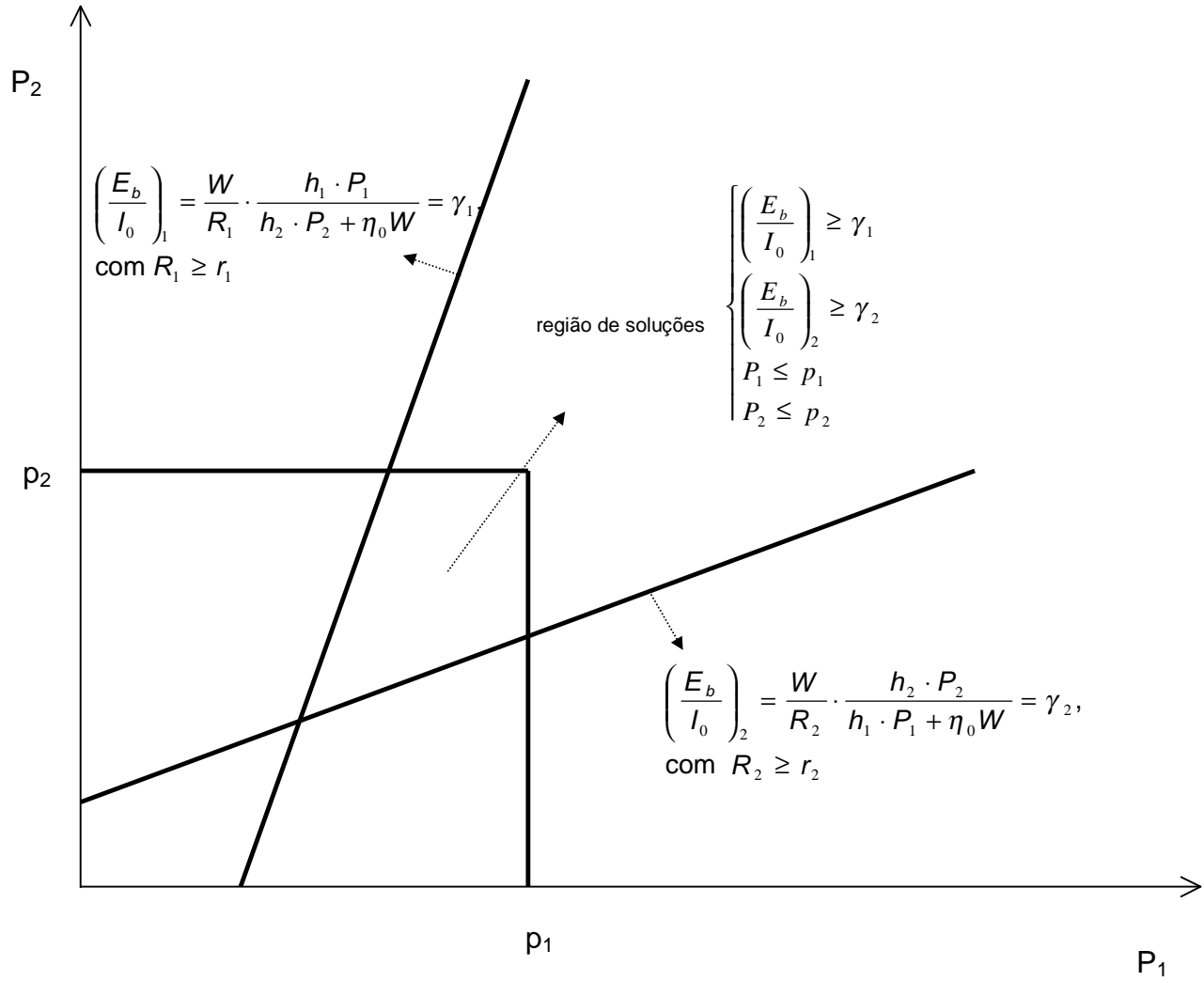


Figura 2.1: Representação gráfica da região de soluções para dois usuários

Para valores determinados de γ_1 e R_1 (especificações do usuário 1), a função $(E_b/I_0)_1 = \gamma_1$ relaciona linearmente $h_1 P_1$ e $h_2 P_2$ e divide o plano $P_1 \times P_2$ em duas

regiões, $(E_b/I_0)_1 \geq \gamma_1$ e $(E_b/I_0)_1 < \gamma_1$ (a reta não passa pela origem devido à presença de ruído de fundo).

A região $(E_b/I_0)_1 \geq \gamma_1$, de valores maiores de P_1 , é a região inicial de soluções para o usuário 1, falta ainda considerar sua restrição de potência máxima: a reta $P_1 = p_1$ intercepta e restringe a primeira região. O mesmo vale para o usuário 2 (a região final inclui as bordas).

Observar o efeito de um aumento nos valores mínimos de γ e R de qualquer usuário: o coeficiente angular da reta correspondente aumenta, diminuindo a região de soluções e aumentando as potências. Mesmo sem limitação de potências de transmissão, nem todos os conjuntos de requisitos têm solução. Para larguras de banda W maiores, a região de soluções aumenta.

Usando a modelagem anterior, e supondo um sistema com classes de serviço, ou seja, em que os usuários são agrupados por tipo de serviço que utilizam, e têm os mesmos valores de QoS e taxa por grupo, o gráfico anterior também pode representar a solução do problema para duas classes de N_1 e N_2 usuários (classes 1 e 2), na condição de que as potências de recepção $h_i P_i$ por classes sejam idênticas, ou seja, controle perfeito de potência. Temos:

$$(E_b/I_0)_1 = \frac{W}{R_1} \cdot \frac{h_1 \cdot P_1}{(N_1 - 1) \cdot h_1 \cdot P_1 + N_2 \cdot h_2 \cdot P_2 + \eta_0 W} = \gamma_1$$

Nesse caso, $h_1 P_1$ representa a potência recebida de qualquer usuário de Classe 1 e vale:

$$h_1 \cdot P_1 = \frac{(E_b/I_0)_1}{\frac{W}{R_1} - (E_b/I_0)_1 \cdot (N_1 - 1)} \cdot (N_2 \cdot h_2 \cdot P_2 + \eta_0 W) \quad (2.4)$$

Na representação das classes no plano $P_1 \times P_2$, utilizamos valores de h_1 e h_2 únicos para todos os usuários de cada classe, o que não ocorre de fato. Da solução encontrada, que depende desses valores, podem-se obter facilmente as potências de cada usuário, levando-se em conta os valores reais.

Além do efeito dos aumentos de QoS e taxa sobre as soluções, observamos que aumentos de N_1 e N_2 também diminuem a região de soluções.

Através da modelagem exposta, escrevemos um conjunto de restrições que deve ser atendido para a alocação de recursos numa célula CDMA multimídia. Dada uma região de solução não vazia, nosso próximo objetivo é procurar vetores-solução ótimos, segundo diferentes critérios.

2.2 Critério de Otimização de Potência Total Mínima

Nesse caso, podemos formular o problema como sendo, [Samp95]:

Função objetivo:

$$\min \sum_{i=1}^N P_i \quad (2.5)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} \left(\frac{E_b}{I_0} \right)_i &= \frac{W}{R_i} \cdot \frac{h_i \cdot P_i}{\sum_{j \neq i} h_j \cdot P_j + \eta_0 W} \geq \gamma_i, \quad i = 1, \dots, N \\ 0 &< P_i \leq p_i, \quad i = 1, \dots, N \\ R_i &\geq r_i, \quad i = 1, \dots, N \end{aligned}$$

Como a função objetivo e as condições são lineares em relação a P_i , trata-se de um problema de programação linear. Enfatizamos que o vetor \mathbf{h} é um dado do problema, isto é, corresponde a uma configuração dada de usuários na célula.

Como já discutimos, a potência de transmissão total necessária aumenta proporcionalmente ao aumento de desempenho. Vale a seguinte proposição:

Proposição

Na solução ótima, [Samp95]:

- os QoS são atendidos nos valores mínimos necessários, ou seja:

$$\left(\frac{E_b}{I_0} \right)_i = \gamma_i \quad (2.6)$$

- as taxas também são atendidas nos valores mínimos necessários:

$$R_i = r_i \quad (2.7)$$

Para verificar esse ponto, suponha que, na solução ótima, o usuário k tenha:

$$\left(\frac{E_b}{I_0} \right)_k = \frac{W}{R_k} \cdot \frac{h_k \cdot P_k}{\sum_{j \neq k} h_j \cdot P_j + \eta_0 W} > \gamma_k$$

Nesse caso, a k -ésima potência (e qualidade de serviço) poderiam ser reduzidas, desde que se mantendo $(E_b/I_0)_k \geq \gamma_k$, e isso apenas melhoraria as qualidades de serviço dos demais usuários, permitindo inclusive reduzir as suas potências de transmissão.

Ou seja, reduzir a potência do usuário cujos requisitos estão sendo atendidos com excesso, permite obter uma nova solução de potências, menor que a primeira; isso mostra que a solução inicial não era ótima e, portanto, na solução ótima, todos os requisitos de QoS e taxa são atendidos com igualdade.

Na solução ótima, sejam os vetores de QoS e taxas:

$$\mathbf{R}^* = [r_1, r_2, \dots, r_N]$$

e

$$(\mathbf{E}_b/I_0)^* = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N]$$

O vetor de potências ótimas:

$$\mathbf{P}^* = [P_1^*, P_2^*, \dots, P_N^*]$$

é tal que:

$$\frac{W}{r_i} \cdot \frac{h_i \cdot P_i^*}{\sum_{j \neq i} h_j \cdot P_j^* + \eta_0 W} = \gamma_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (2.8)$$

Para o caso $N=2$, corresponde graficamente à solução:

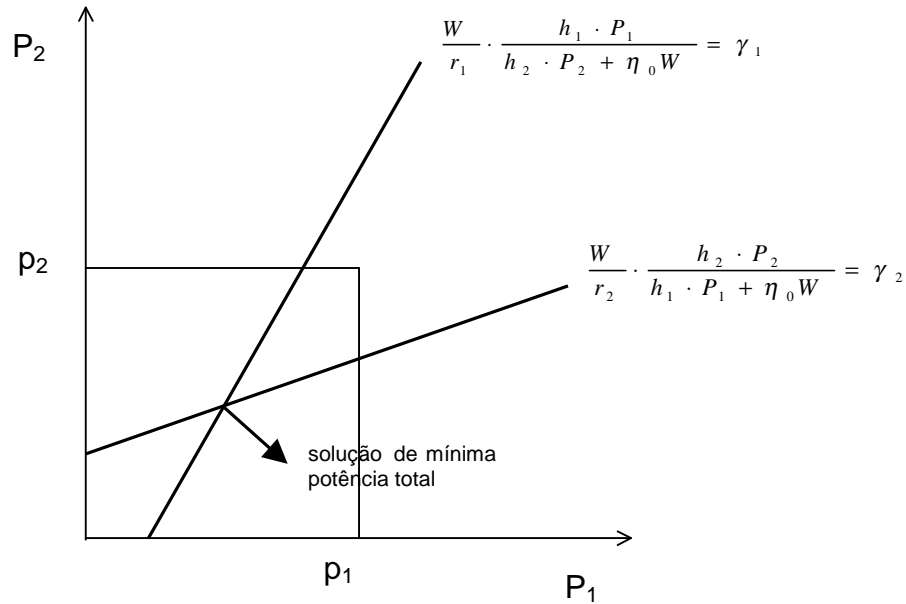


Figura 2.2: Solução de Mínima Potência Total para dois usuários

Manipulando a expressão anterior, temos:

$$\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} \cdot h_i \cdot P_i^* - \sum_{j \neq i} h_j \cdot P_j^* = \eta_0 W$$

Adicionando-se e subtraindo-se a parcela $h_i \cdot P_i^*$ aos termos do lado esquerdo, o resultado não é alterado:

$$\left(\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot h_i \cdot P_i^* - \sum_{j=1}^N h_j \cdot P_j^* = \eta_0 W$$

e o segundo termo passa a ser independente de i .

Escrevendo-se essa última expressão para dois usuários distintos, i e k , e subtraindo-se termo a termo, temos:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot h_i \cdot P_i^* - \sum_{j=1}^N h_j \cdot P_j^* &= \eta_0 W \\ \left(\frac{W}{r_k \cdot \gamma_k} + 1 \right) \cdot h_k \cdot P_k^* - \sum_{j=1}^N h_j \cdot P_j^* &= \eta_0 W \end{aligned} \right\} \quad (-) \quad (2.9)$$

$$\left(\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot h_i \cdot P_i^* = \left(\frac{W}{r_k \cdot \gamma_k} + 1 \right) \cdot h_k \cdot P_k^* \quad , \quad \forall i, k$$

O resultado anterior relaciona as potências de usuários distintos. Como já havíamos comentado, há um controle de potências entre usuários, que volta a aparecer nessa expressão. Retornaremos a esse ponto mais adiante.

Tomando-se novamente a expressão de QoS para o usuário i , podemos agora escrever o somatório das N potências apenas em função da potência i de interesse, como segue:

$$\left(\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot h_i \cdot P_i^* - \sum_{j=1}^N h_j \cdot P_i^* \cdot \frac{\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1}{\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1} = \eta_0 W$$

e ainda:

$$\left(\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot h_i \cdot P_i^* \cdot \left[1 - \sum_{j=1}^N \frac{1}{\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1} \right] = \eta_0 W \quad (2.10)$$

Observar que, nessa expressão, o somatório independe de i e se caracteriza apenas pelas especificações de QoS e taxa de todos os usuários. Para que resulte $P_i^* \geq 0$, é necessário impor que:

$$\sum_{j=1}^N \frac{1}{\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1} \leq 1 \quad (2.11)$$

Nesse somatório, temos N termos do tipo:

$$\frac{1}{\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1}$$

que sugerem que o somatório corresponda ao desempenho total normalizado, ou à capacidade da célula com N usuários, normalizada.

De fato, da expressão 2.4, de E_b/I_0 , por exemplo, resulta:

$$N_1 + N_2 \cdot \frac{h_2 \cdot P_2}{h_1 \cdot P_1} + \frac{\eta_0 \cdot W}{h_1 \cdot P_1} = \frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1$$

em que o lado esquerdo representa o equivalente a um número máximo de usuários (capacidade).

Para validar a admissão de novos usuários ou elevar desempenhos em uma célula, a ocupação final resultante deve ser válida. Intuitivamente, deve ser limitada à unidade, o que aparece na expressão 2.11. Verifica-se que nem todos os valores de N e vetores \mathbf{R}^* e $(\mathbf{E}_b/I_0)^*$ são realizáveis, mesmo na ausência de limitações de potência de transmissão, uma vez que a capacidade é limitada. A expressão 2.10 pode ser escrita como:

$$\sum_{j=1}^N \frac{1}{\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1} = 1 - \frac{\eta_0 W}{\left(\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot h_i \cdot P_i^*} \quad (2.12)$$

na qual o lado direito é menor que a unidade, devido ao ruído de fundo. A capacidade total disponível na célula, na verdade, é reduzida devido à parcela

de ruído. Observar que se trata de uma expressão de capacidade estática, ou seja, para uma única configuração, suposta invariante no tempo.

Para uma determinada configuração de usuários, a expressão anterior também nos permite calcular as potências ótimas:

$$P_i^* = \frac{\eta_0 W}{\left(\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot h_i \cdot \left[1 - \sum_{j=1}^N \frac{1}{\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1} \right]} \quad (2.13)$$

Sendo que as demais são:

$$h_i \cdot P_i^* = \frac{\frac{W}{r_k \cdot \gamma_k} + 1}{\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1} \cdot h_k \cdot P_k^* \quad , \quad \forall i, k \quad (2.14)$$

Na prática, a configuração será viável apenas se as potências assim calculadas obedecerem às limitações de potência:

$$0 \leq P_i^* \leq p_i$$

Se a configuração for inviável, o número de usuários e/ou especificações deverão ser reduzidos.

Observar que a expressão 2.14 vincula as potências de todos os usuários e expressa o controle de potência já mencionado. Trata-se de uma generalização do controle de potência convencional para o caso multimídia.

Se dois usuários i e k têm as mesmas especificações, ou pertencem à mesma classe, resulta:

$$h_i \cdot P_i^* = h_k \cdot P_k^*$$

resultando o controle de potência convencional.

Assim, a minimização da potência total requer controle perfeito de potência.

Observar que as expressões 2.13 e 2.14, que nos permitiram calcular as potências utilizadas pelos usuários, não permitem verificar diretamente se a configuração em questão é viável (em termos de capacidade), pois as potências são incógnitas. Calculadas as potências, devemos compará-las aos limites, zero e p_i .

Procuraremos uma expressão de capacidade que possa validar as configurações de usuários para, em seguida, calcularmos as potências. Como vimos, o cálculo das potências envolve determiná-las por meio das expressões 2.13 e 2.14 e verificá-las pelas restrições de potências mínima e máxima.

Poderíamos escrever diretamente:

$$\sum_{j=1}^N \frac{1}{\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1} \leq 1 - \frac{\eta_0 W}{\left(\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot h_i \cdot p_i}, \quad i = 1, \dots, N \quad (2.15)$$

substituindo P_i^* por p_i , o respectivo limite superior, a igualdade se torna desigualdade e nos permite verificar se a configuração desejada é válida, comparando-a usuário a usuário. Uma vez que a comparação deve ser feita para todos os usuários, resultando diferentes valores (em função das taxas,

QoS e potências máximas de cada usuário) e que deve ser satisfeita para todos, a configuração deve atender:

$$\sum_{j=1}^N \frac{1}{\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1} \leq 1 - \frac{\eta_0 W}{\min \left[\left(\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot h_i \cdot p_i \right]}, \quad i = 1, \dots, N \quad (2.16)$$

Essa é a expressão final de capacidade e mostra que usuários com elevados requisitos de taxa e QoS, que estão distantes da rádio base (h_i pequeno) e muito limitados em termos de potência máxima, restringem a capacidade da célula e impactam no desempenho de todos os outros.

As extensões das expressões de capacidade para o caso de K classes de usuários são:

$$\sum_{j=1}^K \frac{N_j}{\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1} \leq 1 \quad (2.17)$$

e

$$\sum_{j=1}^K \frac{N_j}{\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1} \leq 1 - \frac{\eta_0 W}{\min_{j,i} \left[\left(\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1 \right) \cdot p_j \cdot h_i \right]}$$

Nesse caso, as especificações são dadas por classe e os ganhos de percurso, por usuário.

2.3 Critério de Otimização de Taxa Total Máxima

Nesse caso, o problema pode ser formulado como, [Samp95]:

Função Objetivo:

$$\max \sum_{i=1}^N R_i \quad (2.18)$$

Sujeito a:

$$\left(\frac{E_b}{I_0} \right)_i = \frac{W}{R_i} \cdot \frac{h_i \cdot P_i}{\sum_{j \neq i} h_j \cdot P_j + \eta_0 W} \geq \gamma_i, \quad i = 1, \dots, N$$

$$0 < P_i \leq p_i, \quad i = 1, \dots, N$$

$$R_i \geq r_i, \quad i = 1, \dots, N$$

Pode-se demonstrar, como já apresentado, que, também nesse caso, os requisitos de QoS devem ser atendidos com igualdade na solução ótima.

Assim, a função objetivo pode ser re-escrita, em função das potências, como:

$$\max \left(\sum_{i=1}^N f(P) = \frac{W}{\gamma_i} \cdot \frac{h_i \cdot P_i}{\sum_{j \neq i} h_j \cdot P_j + \eta_0 W} = R_i \right) \quad (2.19)$$

Observar que se trata de uma função não linear de \mathbf{P} .

As condições do problema de maximização de taxa são:

$$R_i = \frac{W}{\gamma_i} \cdot \frac{h_i \cdot P_i}{\sum_{j \neq i} h_j \cdot P_j + \eta_0 W} \geq r_i \quad (2.20)$$

$$0 < P_i \leq p_i$$

Se compararmos com as condições da solução de mínima potência total:

$$R_i = \frac{W}{\gamma_i} \cdot \frac{h_i \cdot P_i}{\sum_{j \neq i} h_j \cdot P_j + \eta_0 W} = r_i$$

$$0 < P_i \leq p_i$$

verificamos que se trata do mesmo problema. Portanto, as duas soluções de potências estão na mesma região de soluções, sendo que, no caso de mínima potência total, condiciona-se a solução a valores de taxa mínimos.

Intuitivamente, se não houver solução viável de potências para uma configuração a taxas mínimas, o problema de maximização de taxa também não será viável. Esse é o caso de configurações que ultrapassam a capacidade do sistema para taxas mínimas. No limite, a região de soluções pode ter um único vetor possível, solução de mínima potência total e que também será vetor-solução da maximização das taxas. Nesse caso, todos os usuários transmitem com taxas r_i .

Portanto, o problema de maximização das taxas tem solução se, e somente se, houver solução para o problema de mínima potência total. Existir solução para o último é condição de existência de solução para o primeiro.

2.4 Aproximação do Problema usando Programação Linear

Para um número grande de usuários, podemos fazer a seguinte simplificação, [Samp97]:

$$\frac{h_i \cdot P_i}{\sum_{j \neq i} h_j \cdot P_j + \eta_0 W} \approx \frac{h_i \cdot P_i}{\sum_{j=1}^N h_j \cdot P_j + \eta_0 W}$$

e, fazendo $QoS=\gamma$, vale:

$$\sum_{i=1}^N R_i = \sum_{i=1}^N \left(\frac{W}{\gamma_i} \cdot \frac{h_i \cdot P_i}{\sum_{j=1}^N h_j \cdot P_j + \eta_0 W} \right) = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{W}{\gamma_i} \cdot h_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^N h_i \cdot P_i + \eta_0 W}$$

$$\max \sum_{i=1}^N R_i = \sum_{i=1}^N \frac{W}{\gamma_i} \cdot \max \left(\frac{\sum_{i=1}^N h_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^N h_i \cdot P_i + \eta_0 W} \right) \propto \max \sum_{i=1}^N h_i \cdot P_i \quad (2.21)$$

Portanto o problema aproximado de maximização de taxa resulta uma função objetivo linear em \mathbf{P} :

$$\max \sum_{i=1}^N h_i \cdot P_i \quad (2.22)$$

sujeito a:

$$\left(\frac{E_b}{I_0} \right)_i = \frac{W}{R_i} \cdot \frac{h_i \cdot P_i}{\sum_{j \neq i} h_j \cdot P_j + \eta_0 W} \geq \gamma_i, \quad i = 1, \dots, N$$

$$0 < P_i \leq p_i, \quad i = 1, \dots, N$$

$$R_i \geq r_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (2.23)$$

Apesar de ser um problema de maximização das potências, as condições do problema não permitem que todos os usuários transmitam com potências máximas. Também nesse caso, a solução envolve um controle de potência multi-taxas, ou seja, as potências são controladas afim de garantir os requisitos de desempenho do sistema.

Esse problema, que é, na verdade, de maximização de taxa, difere da minimização de potências porque, no segundo, as taxas (e QoS) são fixadas “a priori” em seus valores mínimos, resultando ocupação mínima para uma

configuração. Agora, ao contrário, as potências e taxas são controláveis e devem ser escolhidas de forma que o “throughput” (e a potência) total resultem máximos (como vimos, maximizar potências corresponde a maximizar taxas e vice-versa).

O problema em questão trata da maximização da soma dos seguintes termos:

$$\begin{aligned} h_1 \cdot P_1 &= R_1 \cdot \frac{\gamma_1}{W} \cdot \left(\sum_{j \neq 1} h_j \cdot P_j + \eta_0 W \right) \\ h_2 \cdot P_2 &= R_2 \cdot \frac{\gamma_2}{W} \cdot \left(\sum_{j \neq 2} h_j \cdot P_j + \eta_0 W \right) \\ &\vdots \\ h_N \cdot P_N &= R_N \cdot \frac{\gamma_N}{W} \cdot \left(\sum_{j \neq N} h_j \cdot P_j + \eta_0 W \right) \end{aligned}$$

sujeitos às condições expressas em 2.23.

Iniciamos pela solução de mínima potência total: atribuindo-se valores mínimos de taxa para todos os usuários, calculamos a ocupação e as potências de uma determinada configuração e comparamos aos limites de ocupação e potência permitidos ($0 < P_i \leq p_i$). Se a solução for possível, ou seja, a ocupação e as potências forem admissíveis, passamos à etapa de incrementar potências e taxas. No problema com duas classes de usuários, com apenas uma à taxas variáveis, a maximização de taxas envolve simplesmente incrementar a taxa variável, que é igual para todos os usuários da classe, até que a ocupação da célula ou qualquer uma das potências de transmissão atinja seu limite máximo. No caso em questão, entretanto, sem classes e em que todos os usuários têm taxas variáveis, valem as seguintes observações:

- aumentar as taxas implica aumentar a ocupação. Quanto maior a ocupação, maiores as taxas e potências totais, como pode ser visto na expressão 2.12. Partindo da ocupação para taxas mínimas, desejamos obter ocupações maiores até atingirmos a máxima.
- no caso de potências limitadas, os aumentos de ocupação estão limitados pelas potências máximas de transmissão. Para potências máximas de transmissão iguais entre usuários, na solução máxima, podemos supor que as perdas de percurso são tais que o usuário mais distante da rádio base estará transmitindo com a potência máxima possível, independente da sua taxa, por ser aquele que tem perda de percurso maior.
- à mesma potência de transmissão, cada usuário pode transmitir à uma determinada taxa, dependendo do QoS e da perda de percurso (expressão 2.24). Para especificações de QoS iguais entre os usuários, quanto mais próximo da rádio base estiver o usuário, maior a taxa possível para uma mesma potência de transmissão e, portanto, maior a ocupação resultante.
- decorre das observações anteriores, que a ocupação da célula é maximizada fazendo-se as taxas de todos os usuários, exceto a do mais próximo à rádio base, mínimas, e maximizando-se essa última. Essa condição também resulta uma relação entre potência própria e interferência multi-acesso (mais ruído) maximizada para o usuário mais próximo, exatamente aquele que pode obter o melhor desempenho para uma potência de transmissão determinada.

Dessa forma, a solução ótima é obtida atribuindo-se taxa mínima para todos os usuários exceto o mais próximo, em seguida, potência máxima para o usuário mais distante, e, por fim, maximizando-se a taxa do usuário mais próximo. A solução ótima, para o caso sem classes de usuários, não é razoável do ponto de vista prático, pois não é equitativa.

No item seguinte, resultados numéricos, calculamos a capacidade estática do sistema, em termos de números de usuários considerando duas classes, voz e dados, primeiramente sem limitações de potência e em seguida para duas situações limitadas (figuras 2.1, 2.2 e 2.3).

Em relação à solução de maximização de taxas descrita, soluções melhores do ponto de vista de distribuição dos recursos podem ser obtidas simplesmente elevando-se as especificações de taxa “mínima” dos usuários ou através da definição de classes de usuários, sendo que todos os usuários de cada classe devem ter o mesmo desempenho (taxa e QoS). A figura 2.4 ilustra o efeito de redução do “throughput” total pelo aumento da especificação de taxa mínima dos usuários. Consideramos 10 usuários de dados distribuídos em uma célula. Para $R_d=8$ kbps (taxa mínima de dados), todos os usuários transmitem a essa taxa, exceto o mais próximo da rádio base, que transmite a 328 kbps, resultando um “throughput” total de 400 kbps. Com $R_d=17$ kbps, todos os usuários transmitem a essa taxa, inclusive o mais próximo, resultando um “throughput” total de 170 kbps. Dessa forma, ilustramos o fato de que a solução máxima do ponto de vista de “throughput” total não é razoável. Observar que

esse fato sugere um esquema de transmissão do tipo “scheduling”, como será detalhado no capítulo seguinte.

Aumentando-se as taxas mínimas ou definindo-se classes, geram-se soluções sub-ótimas do ponto de vista de desempenho total, mas que devem ser preferidas, uma vez que alocam os recursos de forma mais uniforme. Observar ainda que, à medida que a ocupação e o desempenho se elevam, a potência total aumenta, afastando-nos da solução de mínima potência total.

Nos capítulos seguintes analisaremos cenários com classes de usuários, o que se justifica, não apenas por facilidade de análise, mas pelos resultados expostos nesse capítulo.

2.5 Resultados Numéricos

Todos os resultados numéricos desse trabalho foram obtidos utilizando-se o “software” *Mathematica for Windows*, versão 2.2.1, como ferramenta de cálculo numérico e simulação. As rotinas foram desenvolvidas com auxílio de [Wolf96] e encontram-se listadas no item de Anexos.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Largura de banda	W	1,23 MHz
taxa mínima voz	R_v	9,6 kbps
taxas mínimas dados	R_d	4; 8; 14,4 kbps
QoS voz	γ_v	5
QoS dados	γ_d	12; 10; 7,0795
ruído AWGN	η_0	10^{-6}

Tabela 2.1: Especificações para o caso sem limitação de potência

Capacidade do Sistema sem Limitação de Potência

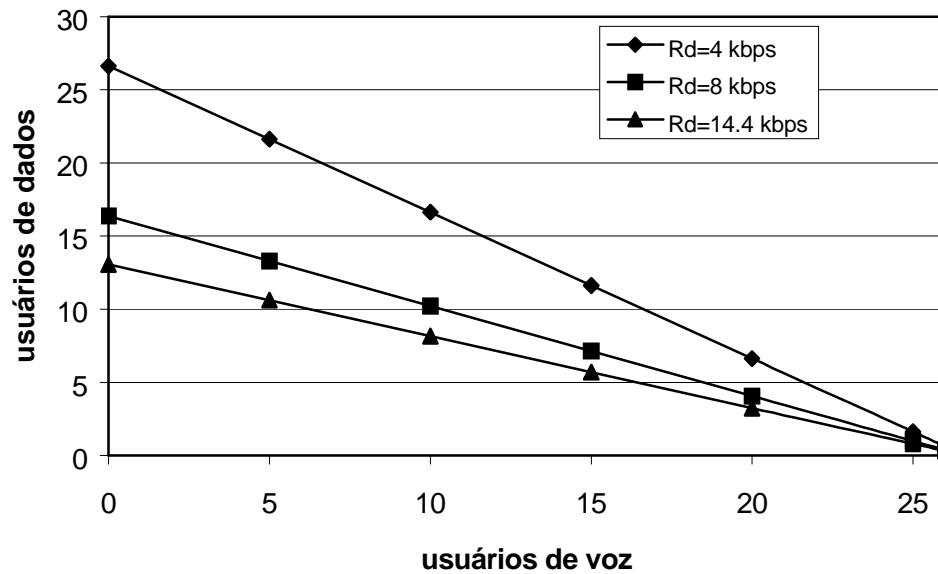


Gráfico 2.1: Capacidade do sistema multi-taxas, sem limitação de potência

Para sistemas limitados em potência temos:

Parâmetro	Símbolo	Valor
Largura de banda	W	1,23 MHz
taxa mínima voz	R_v	9,6 kbps
taxas mínimas dados	R_d	4; 8; 14,4 kbps
QoS voz	γ_v	5
QoS dados	γ_d	12; 10; 7,0795
ruído AWGN	η_0	10^{-6} ; 10^{-7} W/Hz
potência máxima voz	p_v	0,5 W
potência máxima dados	p_d	0,3; 0,5; 0,6 W
ganho mínimo de canal voz	h_v	0,3
ganho mínimo de canal dados	h_d	0,3

Tabela 2.2: Especificações para o caso com limitação de potência

Capacidade do Sistema com Limitação de Potência

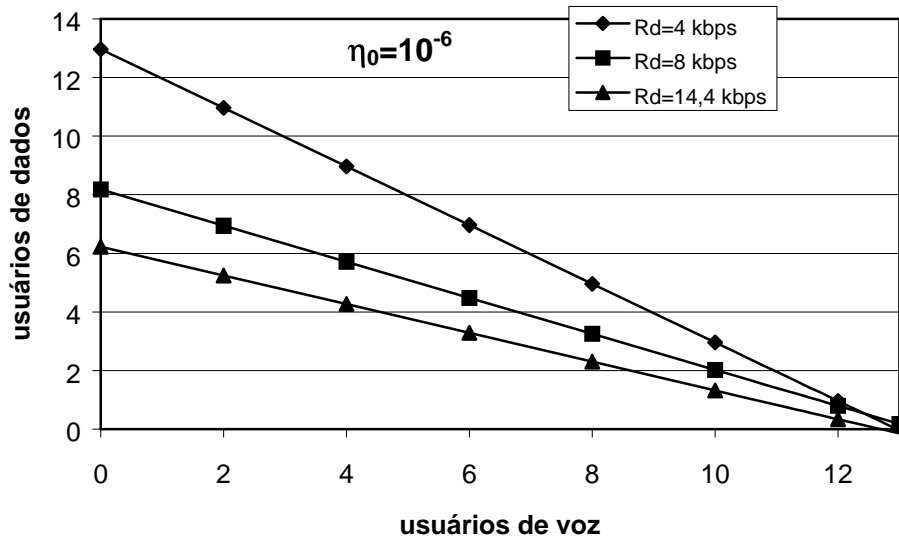


Gráfico 2.2: Capacidade do sistema multi-taxas com limitação de potência e $\eta_0=10^{-6}$

Capacidade do Sistema com Limitação de Potência

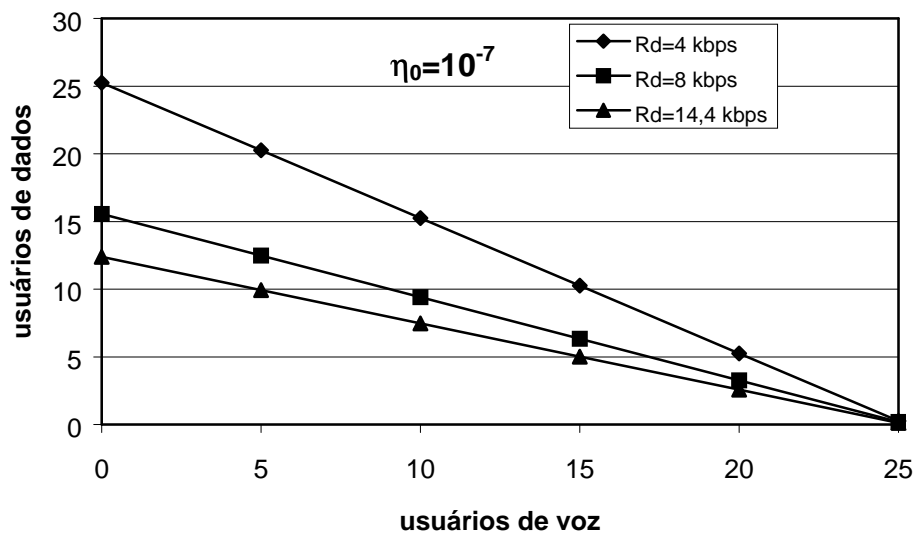


Gráfico 2.3: Capacidade do sistema multi-taxas com limitação de potência e $\eta_0=10^{-7}$

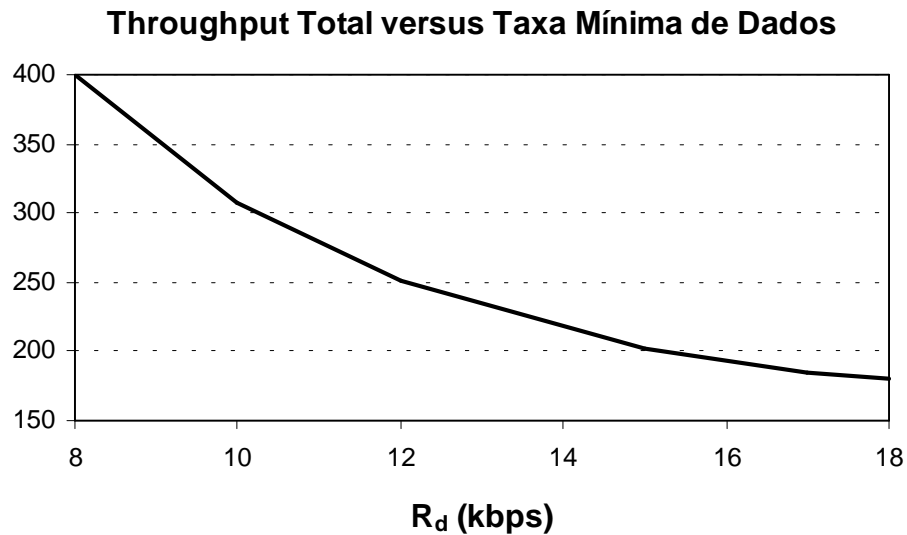


Gráfico 2.4: “Throughput” Total em função da Taxa Mínima de Dados Requerida

Os resultados das figuras 2.1, 2.2 e 2.3 são idênticos aos obtidos em [Samp95] e mostram as capacidades máximas (em números de usuários) para sistemas com diferentes requisitos mínimos de QoS e taxas de dados (atendidos com igualdade) e de potências máximas de transmissão. Observar que a limitação de capacidade em sistemas limitados em potência de transmissão refere-se à relação entre ruído térmico e potência máxima, ou seja, para valores de ruído térmico pequenos, as mesmas limitações de potência não impõem reduções significativas em capacidade (figuras 2.2 e 2.3).

A modelagem de capacidade apresentada nesse capítulo, conforme [Samp97], nos permite avaliar se uma determinada configuração de usuários é admissível e que ocupação de recursos ela representa, para qualidades de serviço

determinadas. Trata-se, portanto, de uma modelagem estática de capacidade, ou seja, supõe que o sistema não está passando pela dinâmica de desaparecimento e surgimento de chamadas no intervalo considerado.

Uma maneira de modelar o problema dinâmico de capacidade é através da probabilidade de bloqueio, ou seja, a probabilidade de um usuário, ao tentar acessar o sistema, não ser atendido naquele instante, por exemplo, por encontrar todos os canais ocupados [Vite93].

A capacidade do sistema passa a ser definida como o número máximo de usuários, ou o tráfego máximo, que se pode atender com qualidades de serviço especificadas e com uma determinada probabilidade máxima de bloqueio para novas tentativas de acesso. Neste trabalho utilizaremos a modelagem estática de capacidade, conforme descrita nesse capítulo, como ferramenta básica de análise.

3.

MAXIMIZAÇÃO DE “THROUGHPUT” E “SCHEDULING” EM SISTEMAS CDMA MULTI- TAXAS IDEAIS

No capítulo anterior, resolvemos o problema de alocação das potências de transmissão mínimas necessárias para uma configuração $(\mathbf{N}, \mathbf{r}, \mathbf{\Gamma})$ dada de usuários, em um sistema CDMA multi-classes, e determinamos uma expressão de capacidade máxima para o sistema, em função de sua própria limitação de banda e de potências e requisitos de desempenho dos usuários.

Essa expressão de capacidade pôde ser otimizada visando à maximização de taxas, o que resultou equivalente à maximização das potências de transmissão.

Isso nos afasta da solução de mínima potência total e aumenta a interferência gerada na célula e o consumo de bateria dos móveis.

A maximização de taxa do capítulo anterior resultou, ainda, uma solução que atribui ao usuário mais próximo da rádio-base a taxa máxima, enquanto os demais utilizam taxas mínimas. Essa solução não é satisfatória na prática, porque não atende adequadamente à maioria dos usuários. Vimos que uma solução mais adequada implica definir classes de usuários e atribuir desempenhos (taxas e QoS) idênticos entre os usuários de uma mesma classe, o que, apesar de reduzir a taxa total, distribui os recursos de forma mais aceitável. Essa será a condição analisada nesse capítulo, particularmente, para duas classes de usuários, como será definido adiante.

A maximização de taxa total proposta consistirá em atribuir ao usuário mais distante (que será denominado “usuário mais limitado”) a potência máxima possível, e calcular as taxas que podem ser obtidas pelos usuários de cada classe, nessa situação. Observar que essa condição implica elevar a ocupação do sistema ao máximo possível.

A solução de maximização de taxas deve atender os seus (novos) requisitos de taxa (e QoS) com igualdade e, portanto, vai requerer um controle perfeito de potência. Assim, ela pode ser interpretada como uma nova solução de “potência total mínima”, para especificações de taxas “mínimas” bem mais elevadas do que as originais. Isso significa que não há outra solução que

resulte o mesmo “throughput” total com potências totais menores ou iguais às que serão obtidas. Evidentemente, essas potências “mínimas” da maximização de taxas são maiores que aquelas correspondentes a taxas mínimas.

Nesse capítulo, vamos estudar, ainda, uma modificação no esquema de transmissão do sistema CDMA que visa a aumentar ainda mais a taxa total e que será comparada à solução de maximização de taxa descrita até aqui [Ram98b].

O sistema CDMA, definido no IS-95, foi desenvolvido sobretudo para aplicações de voz, não estando preparado para atender classes de serviço à taxas altas. Nesse capítulo, nosso objetivo é estudar uma proposta de adaptação ao sistema CDMA convencional, que o torna mais eficiente na utilização de banda, e, portanto, com mais capacidade para atender tráfego multimídia e taxas elevadas.

Mostraremos que o esquema de CDMA proposto é mais eficiente em termos do “throughput” total, e, portanto, capacidade, sem as desvantagens da solução de maximização de taxas discutida no capítulo anterior. Esse esquema se aplica a um cenário predominantemente de serviços de dados, uma vez que se baseia na propriedade de tolerância a atraso.

A idéia básica é distribuir no tempo a transmissão dos usuários tolerantes a atraso, de forma que, em cada instante, apenas uma parcela deles esteja

transmitindo. Isso reduzirá a interferência de multi-acesso, e, portanto, permitirá que, ao transmitir, os usuários utilizem taxas mais elevadas. Em determinadas condições, essa técnica resultará em um aumento significativo do “throughput” do sistema.

Consideraremos um sistema CDMA com taxa de “chip” única, ou seja, ganhos de processamento variáveis, em função das taxas de dados dos usuários.

3.1 Modelagem

Utilizaremos nesse trabalho um caso de multi-classes particularmente simples, com duas classes de serviço, [Ram98b]:

- Classe 1 - usuários de voz

N_1 usuários, utilizam taxa de bits constante, r_1 , são intolerantes a atraso e especificam uma taxa de erro de bit (BER) máxima Pb_1 .

- Classe 2 - usuários de dados

N_2 usuários, são tolerantes a atraso, especificam uma taxa mínima de bits, r_2 , e uma taxa de erro de bit (BER) máxima, Pb_2 .

Quando não transmitem, os usuários de Classe 2 devem manter sincronismo com a rádio base, à taxa R_0 .

Consideremos uma situação em que há N_1 usuários de Classe 1 e N_2 de Classe 2 em uma célula. Iremos estudar um modo de transmissão que utiliza “scheduling” e compará-lo, em termos de maximização de “throughput”, com o modo convencional. Em ambos os modos de transmissão, usuários de mesma classe transmitem a taxas idênticas, que serão r_1 e R_2 ou r_1 , R_2^* e R_0 , para Classes 1 e 2, nos modos convencional e “scheduling”. A notação r_1 , R_2 utilizada se deve ao fato de que a Classe 1 tem taxa constante, sempre fixada em seu valor mínimo, e a Classe 2 tem liberdade para incrementá-la, obedecendo $R_2 \geq r_2$ e à capacidade do sistema.

Temos, portanto, [Ram98b]:

- Modo 1 – transmissão convencional

Todos os usuários podem transmitir a qualquer instante.

- Modo 2 – transmissão em modo “scheduling”

Modo “scheduling” significa que as transmissões dos usuários de Classe 2 são programadas no tempo, de modo que a cada instante apenas uma parcela deles, k_2 usuários, transmitam; os demais $(N_2 - k_2) \geq 0$ mantêm sincronismo, à taxa constante R_0 .

Nos seus “time slots” de transmissão, os usuários de dados transmitem à taxa R_2^* , idêntica para todos, a máxima possível atendendo à capacidade do sistema.

Considerando uma divisão uniforme dos tempos de transmissão entre os usuários de Classe 2, cada usuário tem um “duty cycle” (fração do tempo destinada à sua transmissão) de k_2/N_2 .

Um de nossos objetivos será determinar em que condições o modo “scheduling” é mais eficiente do ponto de vista de taxa total e aproveitamento da banda.

Intuitivamente, pode-se constatar que a interferência interna é bastante reduzida com essa técnica, uma vez que as potências interferentes passam a ser, apenas, devido aos usuários de voz e usuários de dados mantendo sincronismo (cujas potências são muito reduzidas).

A questão do aumento de capacidade devido ao “scheduling” pode ser colocada da seguinte maneira:

Em que condições a redução de interferência interna produz um ganho de “throughput” no modo “scheduling” superior à redução de desempenho dos usuários devido aos “duty cycles” de transmissão?

No desenvolvimento a seguir, consideramos um fator de atividade vocal unitário para todos os usuários, o que, na prática, não se verifica, sobretudo,

para a voz. Entretanto, essa simplificação representa um estudo de pior caso e pode ser facilmente revista.

Como já foi apresentado, o esquema de “scheduling”, a ser estudado, também deverá atender às suas especificações de taxas (maximizadas) e QoS com igualdade, o que implica que as potências atribuídas aos usuários devem ser as mínimas necessárias para atingir o desempenho total. Logo, a modelagem desenvolvida no capítulo 2 poderá ser utilizada.

Retomando à expressão 2.16, observamos que, para um problema com classes de usuários idênticos, vale a substituição:

$$\sum_{i=1}^{N_j} \frac{1}{\frac{W}{R_i^{(j)} \cdot \gamma_i^{(j)}} + 1} = \frac{N_j}{\frac{W}{R_j \cdot \gamma_j} + 1} \quad (3.1)$$

resultando a seguinte expressão de capacidade da célula:

$$\frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{W} + 1} + \frac{\frac{N_2}{W}}{\frac{R_2 \cdot \gamma_2}{W} + 1} \leq 1 - \frac{\eta_0 \cdot W}{\min_i \left\{ \left[\left(\frac{W}{R_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot p_i \cdot h_i \right] \right\}_{i=1}^{N_1+N_2}} \quad (3.2)$$

Lembramos que a Classe 1 corresponde à classe de voz, que utiliza taxa fixa r_1 , e a Classe 2 representa usuários de dados, à taxa $R_2 \geq r_2$. Ao escrevermos uma taxa genérica, que represente usuários das duas classes ou de uma delas, a se determinar, utilizaremos a notação de taxa em letra maiúscula.

Observar que podemos adaptar a expressão para o caso multi-celular, substituindo η_0 por:

$$I_T = I_E + \eta_0$$

onde I_T é a densidade espectral de potência da interferência total, I_E é a parcela de interferência externa, inter-células, e η_0 é o termo de ruído AWGN. Esse caso será estudado no capítulo 5.

Re-escrevendo a expressão 2.13, para potência mínima P_i , temos:

$$P_i = \frac{I_T \cdot W}{\left(\frac{W}{R_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot h_i \cdot \left[1 - \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} - \frac{N_2}{\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_2} + 1} \right]} \quad (3.3)$$

Estamos interessados em calcular a população de usuários de cada classe, as taxas máximas de Classe 2 possíveis e as potências mínimas em cada configuração do sistema. Consideramos que as qualidades de serviço deverão ser atendidas com igualdade, de acordo com especificações dadas.

O problema de capacidade tem as seguintes variáveis: N_1 , N_2 , r_1 e R_2 . Em cada cenário, partiremos de três variáveis conhecidas e calcularemos a outra, determinando uma configuração.

Normalmente, a população de usuários de voz, N_1 , e a taxa de voz, r_1 , são dadas. Em situações em que não conhecemos um número suficiente das variáveis, ou mesmo no caso de mais de duas classes de serviço, podemos

obter soluções parametrizadas em função de valores como taxa de voz, e observar o efeito de variações nesses parâmetros.

No capítulo anterior, utilizamos a expressão de capacidade para determinar as populações máximas de voz e dados, fixando a população de voz e variando a população de dados até o limite.

Nesse capítulo, vamos indicar expressões que permitem obter o número máximo de usuários de dados diretamente. Em seguida, determinaremos a taxa máxima suportada por um número de usuários de dados menor ou igual ao máximo, ou, inversamente, o número máximo de usuários para uma determinada taxa.

Esses cálculos serão realizados nos modos convencional e “scheduling” e comparados através de cálculo dos ganho obtidos em modo “scheduling”.

Inicialmente consideraremos o caso de controle perfeito de potência, em que os QoS (E_b/I_0) medidos na estação rádio base são constantes e idênticos aos especificados. Isso significa que todas as potências estão sendo corrigidas dinamicamente em função de variações de posição e de condições de propagação, para que as amplitudes recebidas sejam idênticas. Essa situação, na prática, é impossível de ser realizada, e será revista no capítulo 3.

Outra idealização que será adotada nesse capítulo supõe não haver limitação das potências de transmissão máximas dos usuários, ou seja, as potências instantâneas são irrestritas.

Sem limitação de potências, o termo referente ao ruído torna-se desprezível face às potências que podem ser utilizadas e o sistema pode ser visto como ideal. Então, vale a seguinte expressão de capacidade, para um sistema unicelular:

$$\frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{1} + 1} + \frac{\frac{N_2}{W}}{\frac{R_2 \cdot \gamma_2}{1} + 1} \leq 1 \quad (3.4)$$

3.2 Cálculo da Taxa Máxima de Classe 2 – Modo Convencional

Não havendo limitação das potências máximas de transmissão, a maximização de taxas, a partir da solução de mínima potência total, resulta em ocupação unitária e potências infinitas, como será mostrado mais adiante. Isso se deve ao fato de a potência do usuário mais distante da rádio base, não estar limitada, ou a limitação poder ser tão grande quanto se queira.

Se toda a capacidade do sistema puder ser alocada a um conjunto $\{N_1, N_2\}$ de usuários, a taxa máxima R_2 que pode ser alocada indistintamente aos usuários de dados é calculada através de:

$$\frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{1} + 1} + \frac{\frac{N_2}{W}}{\frac{R_2 \cdot \gamma_2}{1} + 1} \leq 1 \quad (3.5)$$

partindo-se de r_2 e aumentando a taxa, até que a expressão se torne uma igualdade. Nesse instante, o sistema estará totalmente carregado e a ocupação será igual à unidade.

Observando a expressão de potência, 3.3, vemos que:

$$\left(\frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{1} + 1} + \frac{\frac{N_2}{W}}{\frac{R_2 \cdot \gamma_2}{1} + 1} \right) \rightarrow 1 \Leftrightarrow P_i \rightarrow \infty$$

Portanto, a taxa R_2 obtida implica potências de transmissão infinitas. Evidentemente, a condição de potências de transmissão irrestritas é uma solução de potências pouco satisfatória na prática. No caso prático, o carregamento do sistema estará mais limitado, devido às parcelas de interferência externa e ruído, que não poderão ser desprezadas, pois as potências de transmissão máximas serão finitas.

Além disso, no caso prático, o ganho de processamento de um sistema CDMA limita as taxas de dados possíveis, pois:

$$GP = \frac{W}{R_2} \gg 1$$

e inteiro

Logo, $R_2 \ll W$ (kbps)

Como veremos mais adiante, há outra maneira de aumentar o “throughput” total na célula, no caso “ideal”, que será utilizada para obtermos potências finitas: partindo-se da expressão de mínima potência total, 3.5, inicialmente, determinamos a máxima ocupação permitida a taxas mínimas (número máximo de usuários à taxas mínimas). Essa será a denominada máxima solução a taxas mínimas. Em seguida, para uma configuração dada, menor que a máxima, aumentamos as taxas dos usuários de dados até que a ocupação da célula nessa configuração se torne igual à da máxima solução a taxas mínima. Denominamos a solução máxima a taxas mínimas de $\{N_1, N_{2,\max}\}$. Para calcular o número máximo admissível de usuários de Classe 2, fixamos a taxa R_2 em seu valor mínimo:

$$\frac{\frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1}}{\frac{N_2^{\max}}{\frac{W}{r_2 \cdot \gamma_2} + 1}} \leq 1 \quad (3.6)$$

então:

$$N_2^{\max} = \left\lfloor \frac{\frac{W}{r_2 \cdot \gamma_2} + 1 - N_1 \cdot \frac{\frac{W}{r_2 \cdot \gamma_2} + 1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1}}{\frac{W}{r_2 \cdot \gamma_2} + 1} \right\rfloor$$

ou:

$$N_2^{\max} = \left\lfloor \left(\frac{W}{r_2 \cdot \gamma_2} + 1 \right) \cdot \left(1 - \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} \right) \right\rfloor \quad (3.7)$$

Observar que, como mencionado no capítulo 2, o primeiro termo entre parêntesis corresponde à capacidade total do sistema. Para calcular $N_{2,\max}$, desconta-se a capacidade ocupada pela Classe 1.

Em seguida, para uma configuração menor, $\{N_1, N_2\}$, no caso ideal, uma maneira de evitar potências infinitas é fazer:

$$\frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{W} + 1} + \frac{\frac{N_2}{W}}{\frac{R_2 \cdot \gamma_2}{W} + 1} = \frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{W} + 1} + \frac{\frac{N_2^{\max}}{W}}{\frac{r_2 \cdot \gamma_2}{W} + 1} \quad (3.8)$$

igualando à ocupação de $\{N_1, N_{2,\max}\} < 1$.

As potências médias, em um intervalo, e instantâneas são idênticas entre si e para todos os usuários, por considerarmos atividade vocal unitária. Os valores de potência das Classes 1 e 2 podem ser calculadas através de:

$$P_1 = \frac{I_T \cdot W}{\left(\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1 \right) \cdot h_j^{(1)} \cdot \left[1 - \frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{W} + 1} - \frac{\frac{N_2}{W}}{\frac{R_2 \cdot \gamma_2}{W} + 1} \right]} \quad (3.9)$$

$$P_2 = \frac{I_T \cdot W}{\left(\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_2} + 1 \right) \cdot h_j^{(2)} \cdot \left[1 - \frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{W} + 1} - \frac{\frac{N_2}{W}}{\frac{R_2 \cdot \gamma_2}{W} + 1} \right]}$$

Para um carregamento do sistema menor que a unidade, observamos que cada usuário tem um valor de potência que é função de sua perda de percurso, seu desempenho e do próprio carregamento. Independente do usuário que transmite, a potência recebida na rádio base, por classe, é a mesma, e assim, tem-se controle perfeito de potência.

Uma vez que as potências recebidas por classe são idênticas, o mesmo ocorre com as taxas e, nesse caso, maximizar a taxa total equivale a maximizar cada taxa.

Nesse capítulo, iremos comparar a maximização de taxas apresentada e a maximização usando “scheduling”, descrita a seguir. Na maximização sem “scheduling”, utilizaremos o cálculo que resulta potências infinitas e ocupação unitária, por resultar taxa total mais elevada. Apenas ao compararmos as potências utilizadas nos modos convencional e “scheduling”, utilizaremos a ocupação limitada pela máxima solução de taxas mínimas, por resultar potências finitas. A maximização com “scheduling” será descrita no próximo item.

3.3 Cálculo da Taxa Máxima de Classe 2 – Modo

“Scheduling”

Nesse modo, as transmissões dos usuários de Classe 2 são programadas no tempo, de maneira que apenas $k_2 < N_2$ estejam transmitindo simultaneamente, enquanto os demais mantêm apenas sincronismo com a rádio base.

A capacidade do sistema é alocada da seguinte forma:

$$\frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{W} + 1} + \frac{\frac{k_2}{W}}{\frac{R_2^* \cdot \gamma_2}{W} + 1} + \frac{\frac{N_2 - k_2}{W}}{\frac{R_0 \cdot \gamma_2}{W} + 1} \leq 1 \quad (3.10)$$

Para efeito de comparação entre as possíveis maximizações de taxa em modos convencional e “scheduling”, devemos fazer:

$$\frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{W} + 1} + \frac{\frac{k_2}{W}}{\frac{R_2^* \cdot \gamma_2}{W} + 1} + \frac{\frac{N_2 - k_2}{W}}{\frac{R_0 \cdot \gamma_2}{W} + 1} = \frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{W} + 1} + \frac{\frac{N_2}{W}}{\frac{R_2 \cdot \gamma_2}{W} + 1} \quad (3.11)$$

Dessa forma, garantimos que as ocupações (e as potências totais) são iguais nos dois casos, como veremos adiante, e calculamos ganhos reais de “throughput” devido ao “scheduling”.

Manipulando a expressão anterior, obtemos:

$$R_2^* = \frac{k_2 \cdot R_0 \cdot \left(\frac{W}{\gamma_2} + R_2 \right) + N_2 \cdot \frac{W}{\gamma_2} \cdot (R_2 - R_0)}{k_2 \cdot \left(\frac{W}{\gamma_2} + R_2 \right) - N_2 \cdot (R_2 - R_0)} \quad (3.12)$$

e o “throughput” médio de cada usuário de dados, considerando que ele transmite informação apenas no seu “time-slot”, é:

$$T = \frac{k_2}{N_2} \cdot R_2^* = \frac{k_2^2 \cdot R_0 \cdot \left(\frac{W}{\gamma_2} + R_2 \right) + N_2 \cdot k_2 \cdot \frac{W}{\gamma_2} \cdot (R_2 - R_0)}{k_2 \cdot N_2 \cdot \left(\frac{W}{\gamma_2} + R_2 \right) - N_2^2 \cdot (R_2 - R_0)} \quad (3.13)$$

As potências médias e instantâneas dos usuários de Classe 1 também são idênticas, valendo:

$$P_{1,sch} = \frac{I_T \cdot W}{\left(\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1 \right) \cdot h_j^{(1)} \cdot \left[1 - \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} - \frac{k_2}{\frac{W}{R_2^* \cdot \gamma_2} + 1} - \frac{N_2 - k_2}{\frac{W}{R_0 \cdot \gamma_2} + 1} \right]} \quad (3.14)$$

e observando as expressões 3.9 e 3.11, concluímos que as potências de voz permaneceram inalteradas.

Fazendo:

$$Z = 1 - \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} - \frac{k_2}{\frac{W}{R_2^* \cdot \gamma_2} + 1} - \frac{N_2 - k_2}{\frac{W}{R_0 \cdot \gamma_2} + 1}$$

e

$$Y = 1 - \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} - \frac{N_2}{\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_2} + 1} = Z$$

devido a expressão 3.11, temos que, com relação aos usuários de Classe 2, as potências médias e instantâneas são diferentes, devido aos “duty cycles”. As potências médias serão:

$$P_{2,sch}^{med} = \frac{k_2}{N_2} \cdot \frac{I \cdot W}{\left(\frac{W}{R_2^* \cdot \gamma_2} + 1 \right) \cdot h_j^{(2)} \cdot Z} + \frac{N_2 - k_2}{N_2} \cdot \frac{I \cdot W}{\left(\frac{W}{R_0 \cdot \gamma_2} + 1 \right) \cdot h_j^{(2)} \cdot Z} \quad (3.15)$$

Re-escrevendo:

$$\begin{aligned}
 P_{2,sch}^{med} &= \frac{1}{N_2} \cdot \frac{I \cdot W}{h_j^{(2)} \cdot Z} \cdot \left(\frac{k_2}{\frac{W}{R_2^* \cdot \gamma_2} + 1} + \frac{N_2 - k_2}{\frac{W}{R_0 \cdot \gamma_2} + 1} \right) = \frac{1}{N_2} \cdot \frac{I \cdot W}{h_j^{(2)} \cdot Z} \cdot \left(\frac{N_2}{\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_2} + 1} \right) = \\
 &= \frac{I \cdot W}{\left(\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_2} + 1 \right) \cdot h_j^{(2)} \cdot Z} = \frac{I \cdot W}{\left(\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_2} + 1 \right) \cdot h_j^{(2)} \cdot Y} = P_2
 \end{aligned}$$

e, portanto, a potência média de Classe 2, no modo “scheduling”, é igual às potências média e instantânea do modo convencional, como havíamos comentado. Isso significa que os possíveis ganhos de “throughput” que vamos investigar não significam dispêndio adicional de potência ao se utilizar o “scheduling”.

A potência instantânea máxima vale:

$$P_{2,sch}^{inst} = \frac{I \cdot W}{\left(\frac{W}{R_2^* \cdot \gamma_2} + 1 \right) \cdot h_j^{(2)} \cdot Z} = \frac{I \cdot W}{\left(\frac{W}{R_2^* \cdot \gamma_2} + 1 \right) \cdot h_j^{(2)} \cdot Y} \quad (3.16)$$

Através da expressão 3.11, obtemos:

$$\begin{aligned}
 P_{2,sch}^{inst} &= \frac{N_2}{k_2} \cdot \frac{I \cdot W}{\left(\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_2} + 1 \right) \cdot h_j^{(2)} \cdot Y} - \frac{N_2 - k_2}{k_2} \cdot \frac{I \cdot W}{\left(\frac{W}{R_0 \cdot \gamma_2} + 1 \right) \cdot h_j^{(2)} \cdot Y} \approx \\
 &\approx \frac{N_2}{k_2} \cdot \frac{I \cdot W}{\left(\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_2} + 1 \right) \cdot h_j^{(2)} \cdot Y} = \frac{N_2}{k_2} \cdot P_2
 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Apesar de as potências médias serem iguais, as potências instantâneas em modo “scheduling” são significativamente maiores.

Para analisar os possíveis ganhos de “throughput” com “scheduling”, voltamos à expressão 3.13, e, pretendendo maximizá-la, gostaríamos de determinar em que condições as taxas de dados, com “scheduling”, são tais que $T \geq R_2$, conforme descrito em [Ram98a]. Partindo de:

$$T = \frac{k_2}{N_2} \cdot R_2^* = \frac{k_2^2 \cdot R_0 \cdot \left(\frac{W}{\gamma_2} + R_2 \right) + N_2 \cdot k_2 \cdot \frac{W}{\gamma_2} \cdot (R_2 - R_0)}{k_2 \cdot N_2 \cdot \left(\frac{W}{\gamma_2} + R_2 \right) - N_2^2 \cdot (R_2 - R_0)} \geq R_2$$

e, uma vez que R_2 não depende de k_2 , obtemos outra inequação, envolvendo os polinômios $g(k_2)$, quadrático em k_2 , e $h(k_2)$, linear, tal que:

$$T - R_2 = \frac{g(k_2)}{h(k_2)} = \frac{k_2^2 \cdot R_0 \cdot \left(\frac{W}{\gamma_2} + R_2 \right) - k_2 \cdot N_2 \cdot \left(R_2^2 + R_0 \cdot \frac{W}{\gamma_2} \right) + N_2^2 \cdot R_2 \cdot (R_2 - R_0)}{k_2 \cdot N_2 \cdot \left(\frac{W}{\gamma_2} + R_2 \right) - N_2^2 \cdot (R_2 - R_0)} \geq 0$$

A reta $h(k_2)$ é crescente e tem raiz em:

$$k_2 = \frac{N_2 \cdot (R_2 - R_0)}{\frac{W}{\gamma_2} + R_2} < 1 \quad (3.18)$$

O número de usuários de dados que transmitem simultaneamente no “scheduling”, k_2 , na prática tem valores que podem variar de 1 a N_2-1 . Nessa região, $h(k_2)$ já é positivo, não alterando o sinal de $(T-R_2)$.

O coeficiente do termo quadrático de $g(k_2)$ é positivo. Suas raízes, são tais que:

$$r_1 + r_2 = \frac{N_2 \cdot \left(R_2^2 + \frac{R_0 \cdot W}{\gamma_2} \right)}{R_0 \cdot \left(\frac{W}{\gamma_2} + R_2 \right)}$$

$$r_1 \cdot r_2 = \frac{N_2^2 \cdot R_2 \cdot (R_2 - R_0)}{R_0 \cdot \left(\frac{W}{\gamma_2} + R_2 \right)}$$

e, portanto, valem:

$$r_1 = N_2$$

(3.19)

$$r_2 = \frac{N_2 \cdot R_2 \cdot (R_2 - R_0)}{R_0 \cdot \left(\frac{W}{\gamma_2} + R_2 \right)}$$

Logo, temos as seguintes possibilidades:

- $r_1 \leq r_2$

Nosso objetivo é estabelecer condições para $g(k_2) \geq 0$, ou seja $T \geq R_2$. Essas condições aparecerão em função de parâmetros do sistema, como k_2 e R_0 .

Para $r_1 \leq r_2$, $g(k_2) \geq 0$ implica:

- $k_2 \leq r_1$
- $k_2 \geq r_2$

Substituindo:

$$k_2 \leq r_1 \leftrightarrow k_2 \leq N_2 \Rightarrow \text{válido sempre}$$

$$k_2 \geq r_2 \rightarrow k_2 \geq \frac{N_2 \cdot R_2 \cdot (R_2 - R_0)}{R_0 \cdot \left(\frac{W}{\gamma_2} + R_2 \right)} \geq N_2 \Rightarrow \text{impossível}$$

Para $r_1 \leq r_2$, existe uma condição, $k_2 \leq r_1$, que torna $g(k_2) \geq 0$ válido sempre.

Considerar $r_1 \leq r_2$ equivale a:

$$N_2 \leq \frac{N_2 \cdot R_2 \cdot (R_2 - R_0)}{R_0 \cdot \left(\frac{W}{\gamma_2} + R_2 \right)} \Rightarrow R_0 \leq \frac{R_2^2}{\frac{W}{\gamma_2} + 2 \cdot R_2} \quad (3.20)$$

Portanto, para taxas de sincronismo R_0 limitadas ao valor acima, $g(k_2) \geq 0$ é válido sempre, e assim $T \geq R_2$, sempre, para qualquer valor de k_2 .

- $r_2 \leq r_1$

Para $g(k_2) \geq 0$:

- $k_2 \leq r_2$
- $k_2 \geq r_1$

Substituindo:

$$k_2 \leq r_2 \leftrightarrow k_2 \leq \frac{N_2 \cdot R_2 \cdot (R_2 - R_0)}{R_0 \cdot \left(\frac{W}{\gamma_2} + R_2 \right)}$$

$$k_2 \geq r_1 \rightarrow k_2 \geq N_2 \Rightarrow \text{impossível}$$

Observamos que a primeira condição de $g(k_2) \geq 0$ é válida para valores de k_2 limitados a:

$$k_{2,\max} = \frac{N_2 \cdot R_2 \cdot (R_2 - R_0)}{R_0 \cdot \left(\frac{W}{\gamma_2} + R_2 \right)} \quad (3.21)$$

Além disso, só será válida se $r_2 \geq 1$. Se $r_2 < 1$, $k_2 < 1$ não é viável. Fazendo $r_2 \geq 1$, temos:

$$\frac{N_2 \cdot R_2 \cdot (R_2 - R_0)}{R_0 \cdot \left(\frac{W}{\gamma_2} + R_2 \right)} \geq 1 \Rightarrow R_0 \leq \frac{N_2 \cdot R_2^2}{\frac{W}{\gamma_2} + (N_2 + 1) \cdot R_2} \quad (3.22)$$

Resumindo:

$$T \geq R_2 \quad \Leftrightarrow$$

$$R_0 \leq \frac{R_2^2}{\frac{W}{\gamma_2} + 2 \cdot R_2}, \quad \forall k_2 \quad (3.23)$$

$$\frac{R_2^2}{\frac{W}{\gamma_2} + 2 \cdot R_2} \leq R_0 \leq \frac{N_2 \cdot R_2^2}{\frac{W}{\gamma_2} + (N_2 + 1) \cdot R_2}, \quad k_2 \leq \frac{N_2 \cdot R_2 \cdot (R_2 - R_0)}{R_0 \cdot \left(\frac{W}{\gamma_2} + R_2 \right)}$$

Como vimos, as regiões de solução do numerador $g(k_2)$ situam-se sempre entre menos infinito e a menor raiz.

Nessa região, $g(k_2)$ é uma função decrescente de k_2 . Na mesma região, o denominador $h(k_2)$ é uma função crescente de k_2 . Portanto, a função $g(k_2)/h(k_2)$ é decrescente e, portanto, maximizada para o menor valor de k_2 , $k_2=1$.

Definimos:

$$G = \frac{T(k_2=1)}{R_2} = \frac{\frac{R_0}{R_2} \cdot \left(\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_2} + 1 \right) + N_2 \cdot \frac{W}{R_2 \cdot \gamma_2} \cdot \left(1 - \frac{R_0}{R_2} \right)}{N_2 \cdot \left(\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_2} + 1 \right) - N_2^2 \cdot \left(1 - \frac{R_0}{R_2} \right)} \quad (3.24)$$

e analisaremos os valores de G para diversas configurações de usuários.

3.4 Resultados Numéricos

Parâmetro	Símbolo	Valor
Largura de banda	W	1,23 MHz
taxa mínima de Classe 1	R ₁	9,6 kbps
taxa mínima de Classe 2	R ₂	14,4 kbps
QoS de Classe 1	γ ₁	5 (7 dB)
QoS de Classe 2	γ ₂	7,0795 (8,5 dB)
Taxa de sincronismo	R ₀	1,2 kbps
Usuários simultâneos (Classe 2)	k ₂	1

Tabela 3.1: Especificações para Sistema Ideal

**Throughputs em Modos Convencional e Scheduling
para $N_1=15$ e $N_{2,max}=5$**

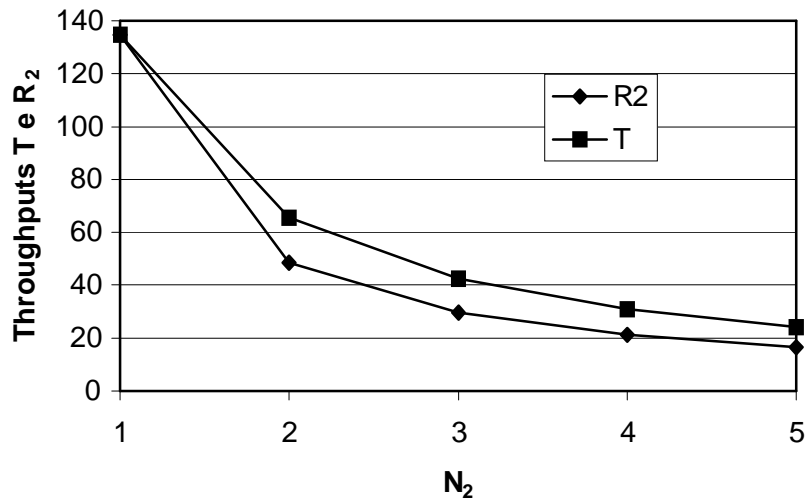


Gráfico 3.1: “Throughputs” (em kbps) obtidos para $N_1=15$ no sistema ideal

**Ganho em Throughput G vs. N_2
para $N_1=15$ e $N_{2,max}=5$**

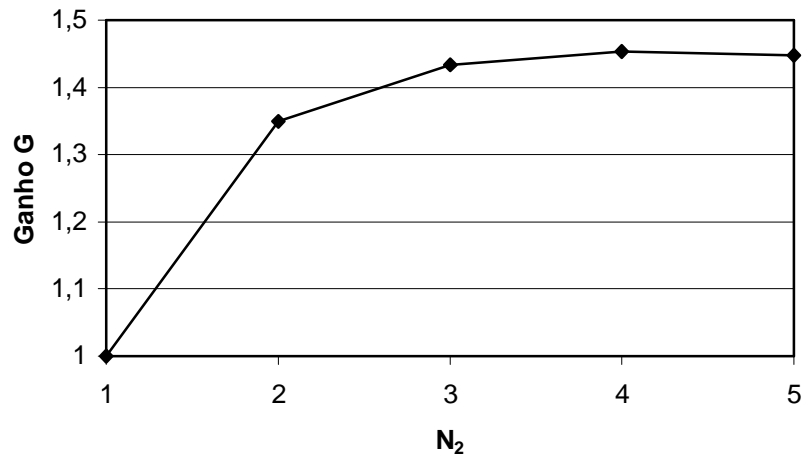


Gráfico 3.2: Ganho obtido para $N_1=15$ no sistema ideal

**Throughputs em Modos Convencional e Scheduling
para $N_1=8$ e $N_{2,max}=9$**

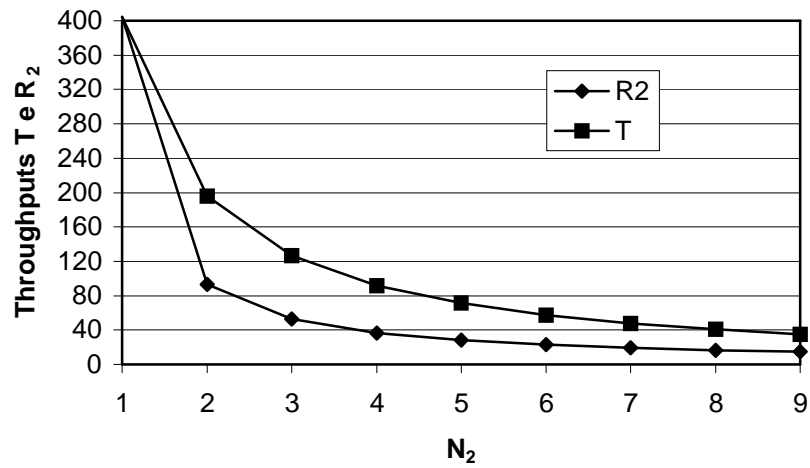


Gráfico 3.3: “Throughputs” (em kbps) obtidos para $N_1=8$ no sistema ideal

**Ganho em Throughput G vs. N_2
para $N_1=8$ e $N_{2,max}=9$**

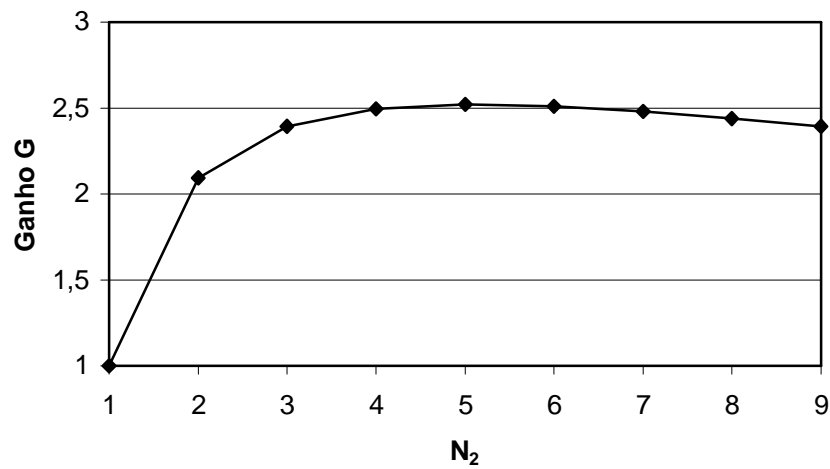


Gráfico 3.4: Ganho obtido para $N_1=8$ no sistema ideal

**Throughputs em Modos Convencional e Scheduling
para $N_1=1$ e $N_{2,max}=12$ (R_2^* limitado)**

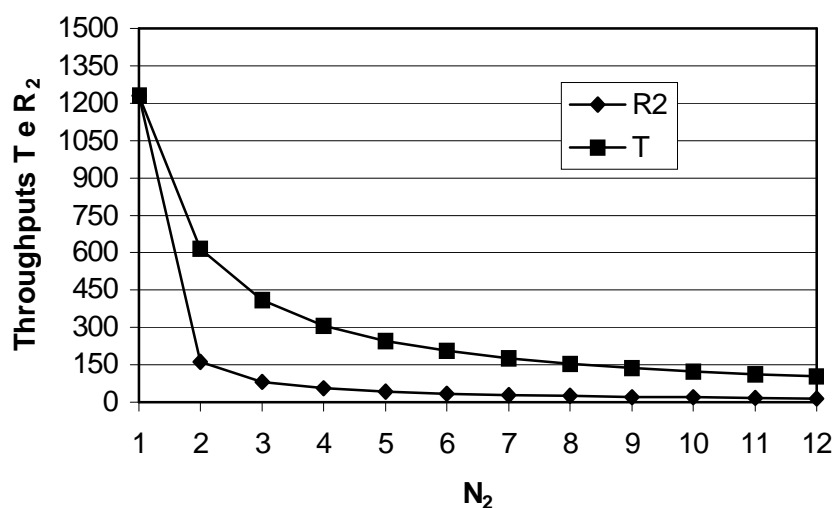


Gráfico 3.5: “Throughputs” (em kbps) obtidos para $N_1=1$ no sistema ideal

**Ganho em Throughput G vs. N_2
para $N_1=1$ e $N_{2,max}=12$**

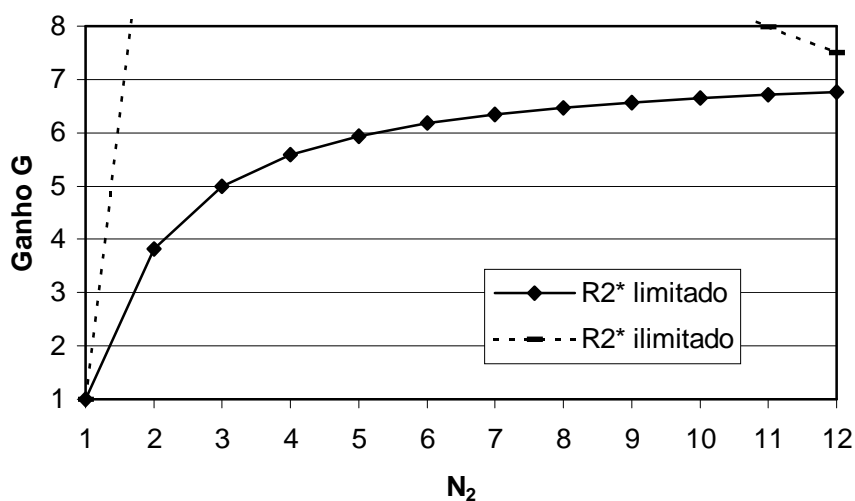


Gráfico 3.6: Ganho obtido para $N_1=1$ no sistema ideal

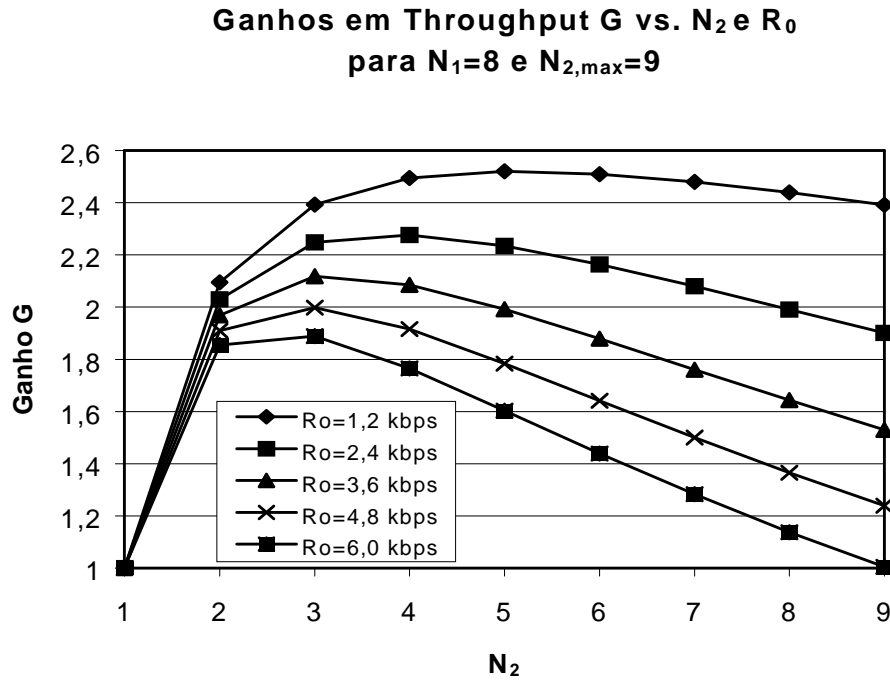


Gráfico 3.7: Ganhos obtidos para $N_1=8$, diversos valores de R_0 , e sistema ideal

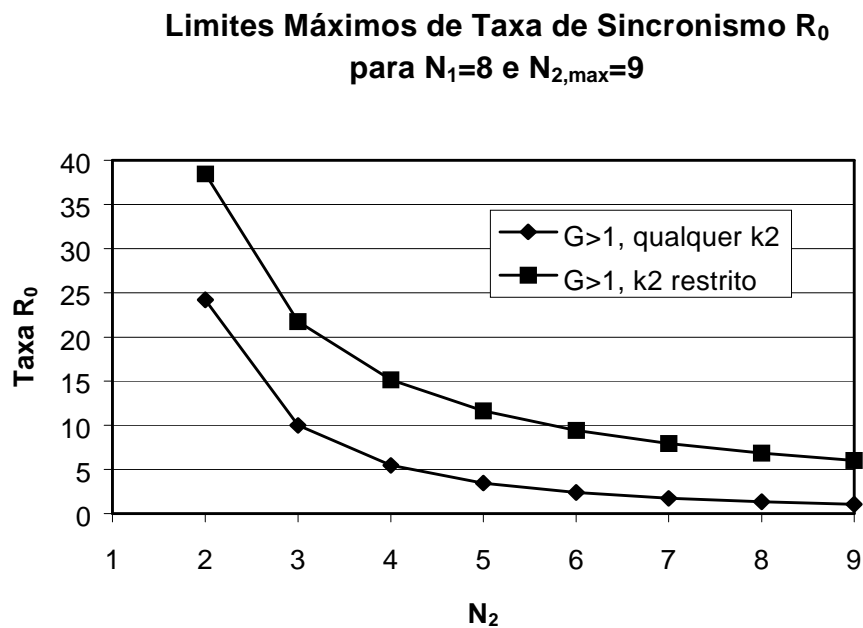


Gráfico 3.8: Limites Máximos de R_0 (em kbps) para que $T \geq R_2$

**Throughputs Totais em Modos Convencional e Scheduling
vs. N_1 e N_2**

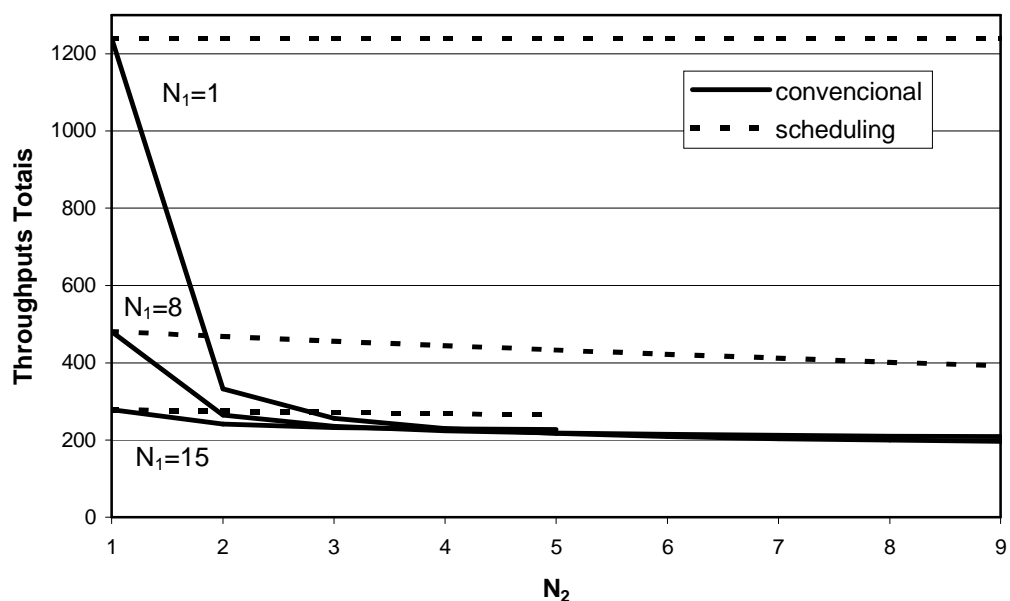


Gráfico 3.9: “Throughput” Total (em kbps)

P_2 em Modos Convencional e Scheduling ($\cdot [1-\text{Ocup.}]$) vs. N_1 e N_2

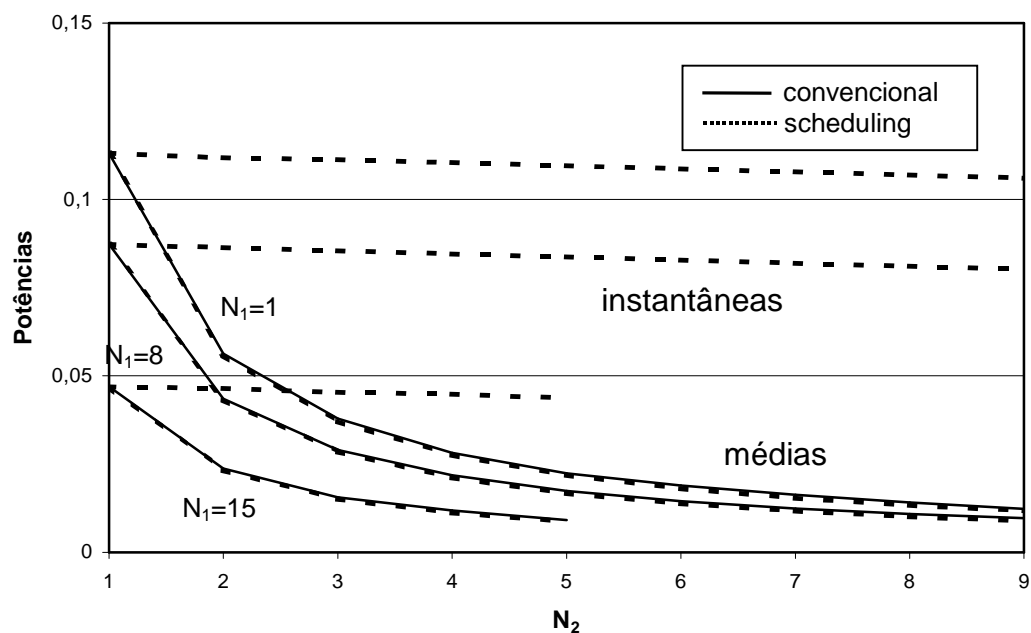


Gráfico 3.10: Potências P_2 instantâneas e médias (em watts), normalizadas pela ocupação de cada configuração

Observar que os ganhos de “scheduling” aumentam à medida que aumenta a população de Classe 2, ou seja, à medida que a população da célula se torna predominantemente insensível a atrasos. Com $N_1=1$, figuras 3.5 e 3.6, a solução de maximização de taxas resulta em valores R^*_2 maiores que W (kbps), o que é impossível na prática. Limitando-se a taxa máxima a esse valor, obtemos resultados mais consistentes com a prática. Observar que os ganhos dependem dos valores de taxa de sincronismo, diminuindo para valores maiores de R_0 , podendo atingir limites em que o ganho desaparece (figuras 3.7 e 3.8).

Os “throughputs” e ganhos de “throughput” apresentados referem-se a valores por usuário de Classe 2. Com relação aos “throughputs” e potências totais (figuras 3.9 e 3.10), observamos que, enquanto o “throughput” total está sempre muito limitado no modo convencional, devido a MAI, no modo “scheduling” ele pode atingir valores bem mais elevados, dependendo da configuração de usuários, mantendo os mesmos níveis de potências médias (as potências instantâneas são bem mais elevadas, conforme mencionado).

4.

MAXIMIZAÇÃO DE “THROUGHPUT” E “SCHEDULING” EM SISTEMAS CDMA MULTI- TAXAS COM CONTROLE IMPERFEITO DE POTÊNCIA

Nesse capítulo, prosseguiremos estudando o sistema CDMA com “scheduling”, agora na condição de controle imperfeito de potência.

O controle de potência do “uplink” de sistemas CDMA é realizado simultaneamente em malha aberta e fechada, e de forma independente para cada estação móvel, [Jesz99].

No controle em malha aberta, a estação móvel mede o nível de potência que está recebendo da rádio base e, a partir do valor recebido, estima a perda de percurso e a potência com que deve transmitir. Na prática, a soma em dB das potências recebida e transmitida deve se manter constante, para cada móvel. O valor constante é informado pela rádio base e depende de parâmetros como ERP (“effective radiated power”), figura de ruído, ganho da antena, E_b/I_0 dos móveis e a ocupação da célula.

Testes em campo mostram que, para o sombreamento e a perda de percurso há forte correlação entre os valores medidos no “uplink” e no “downlink” e, portanto, o controle em malha aberta é suficiente. O desvanecimento Rayleigh, entretanto, relacionado com variações rápidas das condições de propagação, não apresenta correlação entre “uplink” e “downlink” (uma vez que esses canais estão separados por 45 MHz) e, assim, não pode ser estimado pelo controle em malha aberta.

Para estimá-lo, emprega-se um controle em malha fechada adicional. Nesse caso, a rádio base mede cada qualidade de sinal que está recebendo, compara-a com “set points” e re-alimenta a unidade móvel correspondente com informação para incrementar ou decrementar a potência de transmissão, de forma a manter sempre um determinado valor de taxa de erro de bit (BER).

No controle em malha fechada, há duas etapas:

- malha interna, destinada a comparar, a cada 1,25 ms, o valor de E_b/I_0 recebido no “uplink” (medido na rádio base) e um valor pré-fixado de “set point” de E_b/I_0 (escolhido para manter, instantaneamente, uma taxa especificada de erro de bit) e informar à estação móvel sobre incrementos ou decrementos de potência.
- malha externa, mais lenta, destinada a atualizar, a cada 20 ms, o valor de “set point” de E_b/I_0 a ser utilizado na malha interna, em função de alterações nas condições de propagação. Essas atualizações visam a garantir, ao longo do tempo, as taxas de erro de bit especificadas.

Nos cálculos do capítulo anterior supusemos valores de “set points” de E_b/I_0 constantes por usuário e entre eles.

Na prática essa condição não é verificada, devido às variações nas condições de propagação. Como as condições de propagação variam com o tempo, a malha externa atualiza os E_b/I_0 no tempo.

O controle perfeito de potência é impossível de ser realizado na prática, devido, sobretudo, ao desvanecimento do tipo Rayleigh, que pode ser muito rápido, e nem sempre é acompanhado pela malha fechada. Dessa forma, os “set points” de E_b/I_0 , que deveriam estar variando na malha externa de forma a acompanhar o efeito Rayleigh, não conseguem fazê-lo. Isso introduz erros nos “set point” das malhas de controle.

Além disso, ocorrem erros na transmissão dos próprios bits de controle que a rádio base envia às estações móveis (as informações não são transmitidas com códigos corretores de erros), resultando valores de E_b/I_0 medidos diferentes dos “set points”. Observamos, ainda, que o fato de o controle de potência ser realizado individualmente para cada usuário, resulta diferentes qualidades de serviço entre usuários de mesma classe, o que não é desejável.

Sabe-se, ainda, que as variações em E_b/I_0 dependem da velocidade, como descrito em [Hash98].

Portanto, fazer os E_b/I_0 constante significa, em primeiro lugar, desprezar os efeitos da propagação e suas variações no tempo, e, ainda, desconsiderar a impossibilidade de acompanhar, com o esquema de controle de potência, essas variações. A hipótese de controle perfeito de potência leva em conta todas essas simplificações.

Lembramos, ainda, que há também um controle de potência para o “downlink”, atualizado a cada 80 ms, que objetiva manter o sinal transmitido pela rádio base em níveis aceitáveis para a recepção, não demasiadamente elevados.

Nesse capítulo, modelaremos os “set points” de E_b/I_0 como variáveis aleatórias, levando em conta, dessa forma, o caráter variável e aleatório dos E_b/I_0 requeridos.

Como anteriormente:

$$\frac{W}{R_i} \cdot \frac{h_i \cdot P_i}{\sum_{j \neq i} h_j \cdot P_j + \eta_0 \cdot W} = \gamma_i \quad i = 1, \dots, N$$

continua válido, mas os E_b/I_0 requeridos, γ_i , são variáveis aleatórias, o que reflete a imperfeição no controle das potências.

4.1 Modelagem dos E_b/I_0 requeridos

Vamos supor que os E_b/I_0 requeridos (ou especificados, γ) são aqueles necessários para atender às probabilidades de erro admissíveis.

Sabemos que, para um E_b/I_0 especificado, os valores de E_b/I_0 recebidos de fato na rádio base, condicionados ao valor especificado, tem o comportamento de uma variável aleatória log-normal, com média igual à especificação [Ram98b].

Esse comportamento independe do valor de E_b/I_0 especificado, e, ainda, para períodos longos de observação, os E_b/I_0 recebidos acumulados também se comportam como variáveis log-normais.

Como discutimos, na prática, os E_b/I_0 especificados ou requeridos não são constantes, mas variáveis. Nosso objetivo é modelar essas variáveis γ_i , a partir do que conhecemos sobre E_b/I_0 recebidos. Retornaremos a esse ponto logo em seguida.

Suponha que X é uma variável aleatória normal, com densidade de probabilidade:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_X} \cdot \exp\left(-\frac{(x - m_X)^2}{2 \cdot \sigma_X^2}\right), \quad x \in]-\infty, \infty[\quad (4.1)$$

onde m_X e σ_X são a média e o desvio padrão de X .

Podemos definir outra variável aleatória R pela seguinte transformação de X :

$$R = e^X \quad (4.2)$$

Como apresentado em [Papo84], as funções densidade de probabilidade de duas variáveis aleatórias X e Y , quaisquer, com Y definida através de uma transformação $Y=g(X)$, qualquer, de X , relacionam-se através de:

$$f_Y(y) = \sum_i \frac{f_X(x_i)}{\left| \frac{dY}{dX} \right|_{X=x_i}} \quad (4.3)$$

onde cada termo do somatório leva em conta uma raiz real x_i da equação $Y=g(X)$, $i=1, 2, \dots$

No caso específico, definido anteriormente:

$$x_1 = \ln(r)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR}{dX} &= e^X \\ \left. \frac{dR}{dX} \right|_{X=x_1} &= e^{\ln(r)} = r \end{aligned} \quad (4.4)$$

Então:

$$f_R(r) = \frac{f_X(\ln(r))}{r} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_X \cdot r} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln(r) - m_X)^2}{2 \cdot \sigma_X^2}\right), \quad r \geq 0 \quad (4.5)$$

A variável aleatória R , definida por sua função densidade de probabilidade $f_R(r)$, é denominada variável log-normal. Observar que m_X e σ_X em $f_R(r)$ são a média e o desvio padrão da variável X , normal, originária.

Como a transformação $X=\ln(R)$ recupera X a partir de R e X é normal, concluímos que, convertendo-se os valores da variável log-normal R para neper, obtém-se uma variável normal. X pode ser interpretada como a própria variável R , em neper. Alternativamente, se definirmos:

$$S = 10^{\frac{X}{10}} \quad (4.6)$$

Teremos:

$$x'_1 = 10 \cdot \log(s)$$

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dX} &= \frac{\ln(10)}{10} \cdot 10^{\frac{X}{10}}, \quad \frac{\ln(10)}{10} = \lambda \\ \left. \frac{dS}{dX} \right|_{X=x'_1} &= \lambda \cdot 10^{\frac{10 \cdot \log(s)}{10}} = \lambda \cdot s \end{aligned} \quad (4.7)$$

e, assim:

$$f_s(s) = \frac{f_X(10 \cdot \log(s))}{\lambda \cdot s} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_X \cdot \lambda \cdot s} \cdot \exp \left(-\frac{(10 \cdot \log(s) - m_X)^2}{2 \cdot \sigma_X^2} \right), \quad s \geq 0 \quad (4.8)$$

A variável aleatória S também é log-normal, apesar de ter sido definida em outra base. Sua função densidade de probabilidade, $f_s(s)$, também é escrita em termos de m_X e σ_X , média e desvio da variável X .

De modo análogo ao anterior, a transformação $X=10.\log(S)$ recupera X , que representa os valores de S em dB. Portanto, a variável S em dB é normal.

Suponha que desejamos relacionar as distribuições normais correspondentes aos valores de uma variável log-normal T em neper e dB. Sejam X e Y as duas variáveis normais. Calculando $f_T(t)$ a partir das duas variáveis, temos:

$$f_T(t) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_X \cdot t} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln(t) - m_X)^2}{2 \cdot \sigma_X^2}\right)$$

e

$$f_T(t) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_Y \cdot \lambda \cdot t} \cdot \exp\left(-\frac{(10 \cdot \log(t) - m_Y)^2}{2 \cdot \sigma_Y^2}\right) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_Y \cdot \lambda \cdot t} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln(t)/\lambda - m_Y)^2}{2 \cdot \sigma_Y^2}\right)$$

Comparando as expressões, resulta:

$$m_Y = m_X / \lambda$$

$$\sigma_Y = \sigma_X / \lambda$$

e, assim:

$$Y = X / \lambda = X / 0,23026 \quad (4.9)$$

que converte valores entre neper e dB.

Sejam as variáveis aleatórias: $(E_b/I_0)_{ac}$, $(E_b/I_0)_{con}$ e $\gamma=(E_b/I_0)_{esp}$, respectivamente, E_b/I_0 acumulado, condicional, dada uma especificação, e especificado ou requerido. Vale a seguinte relação entre funções densidade de probabilidade:

$$f_{(E_b/I_0)_{ac}}((E_b/I_0)_{ac}) = \int_0^{\infty} f_{(E_b/I_0)_{con}}((E_b/I_0)_{con} | \gamma) \cdot f_T(\gamma) \cdot d\gamma \quad (4.10)$$

Pode-se mostrar que para $(Eb/I_0)_{ac}$ e $(Eb/I_0)_{con}$, variáveis log-normais, essa relação implica γ também log-normal [Ram98a]. Consideraremos, portanto, Eb/I_0 especificado log-normal. As variáveis $(Eb/I_0)_{ac}$ e $(Eb/I_0)_{con}$ são independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.) entre usuários diferentes, e assim será também para γ [Ram98a].

Observando a expressão de capacidade do sistema:

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1} \leq 1 - \frac{\eta_0 W}{\min \left[\left(\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1 \right) \cdot h_j \cdot p_j \right]}$$

desprezamos o último termo, pois não há limitação das potências máximas de transmissão. Considerando uma situação com N_1 usuários de Classe 1 e N_2 usuários Classe 2, como definidos anteriormente, mas com Eb/I_0 requeridos log-normais, temos:

- $\gamma_i^{(1)}$: representa o Eb/I_0 requerido para Classe 1, tal que:

$$\gamma_i^{(1)} = e^{X^{(1)}}, \quad X^{(1)} = N(m_1, \sigma_1^2)$$

onde $N(m_1, \sigma_1^2)$ é uma normal de média m_1 e variância σ_1^2 .

- $\gamma_i^{(2)}$: representa o Eb/I_0 requerido para Classe 2, tal que:

$$\gamma_i^{(2)} = e^{X^{(2)}}, \quad X^{(2)} = N(m_2, \sigma_2^2)$$

onde $N(m_2, \sigma_2^2)$ é uma normal de média m_2 e variância σ_2^2 .

Como vimos, o sistema tem solução com mínima potência total apenas quando a expressão de capacidade acima é satisfeita. Interessa-nos, justamente, maximizar as taxas nessa solução. Uma vez que se trata, agora, de um problema probabilístico, exigir que a capacidade seja válida sempre parece pouco razoável. Vamos propor que, para um período longo de observação, a expressão seja válida 99% do tempo e calcularemos as populações e taxas nessa condição. Populações e taxas máximas que satisfaçam essa condição serão viáveis, caso contrário, deverão ser desconsideradas. Consideraremos ainda que a configuração do sistema não se altera durante os tempos de observação.

Portanto, para:

$$V = \sum_{i=1}^{N_1} \frac{1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_i^{(1)}} + 1} + \sum_{i=1}^{N_2} \frac{1}{\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_i^{(2)}} + 1} \quad (4.11)$$

deve valer:

$$P(V \leq 1) = 1 - \eta \geq 0,99 \quad (4.12)$$

onde η é a probabilidade de não-atendimento, escolhido como, no máximo, 1%.

4.2 Modelagem da Variável Aleatória “V”

A seguir, calcularemos as funções densidade de probabilidade e distribuição acumulada da nova variável aleatória V.

Isso envolverá, primeiramente, a partir das variáveis $\gamma^{(1)}$ e $\gamma^{(2)}$, caracterizar os termos:

$$T_1 = \frac{1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma^{(1)}} + 1} \quad e \quad T_2 = \frac{1}{\frac{W}{R_2 \cdot \gamma^{(2)}} + 1}$$

como variáveis aleatórias; em seguida, caracterizar os somatórios desses termos. A seguir, descreveremos a primeira etapa.

Consideremos que as especificações dos E_b/I_0 , log-normais, requeridos pelas Classes 1 e 2, nos são dadas na forma de média (m_{dB}) e desvio padrão (σ_{dB}) em dB. Como já descrito, essas especificações correspondem às médias e desvios de distribuições normais de valores de E_b/I_0 em dB. Entretanto, pelas definições de $\gamma_i^{(1)}$ e $\gamma_i^{(2)}$ dadas, nossas variáveis são obtidas a partir de transformações do tipo $\exp(X)$, ou seja, a partir de distribuições normais em neper.

Convertendo os parâmetros para neper, e, dessa forma, definindo m_{nep} e σ_{nep} , podemos escrever a densidade de probabilidade dos valores lineares de γ genérico (Classe 1 ou 2) como:

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_{nep} \cdot \gamma} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln(\gamma) - m_{nep})^2}{2 \cdot \sigma_{nep}^2}\right)$$

Fazendo a transformação:

$$T = \frac{1}{\frac{W}{R \cdot \gamma} + 1} \tag{4.13}$$

temos:

$$\gamma_1 = \frac{W}{R} \cdot \frac{T}{1-T}$$

$$\frac{dT}{d\gamma} = \frac{W \cdot R}{(W + R \cdot \gamma)^2}$$

$$\left. \frac{dT}{d\gamma} \right|_{\gamma=\gamma_1} = \frac{R}{W} \cdot (1-T)^2$$

e, portanto:

$$\begin{aligned} f_T(t) &= \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_{nep} \cdot \frac{W}{R} \cdot \frac{t}{1-t} \cdot \frac{R}{W} \cdot (1-t)^2} \cdot \exp \left(- \frac{\left(\ln \left(\frac{W}{R} \cdot \frac{t}{1-t} \right) - m_{nep} \right)^2}{2 \cdot \sigma_{nep}^2} \right) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_{nep} \cdot t \cdot (1-t)} \cdot \exp \left(- \frac{\left(\ln \left(\frac{W}{R} \cdot \frac{t}{1-t} \right) - m_{nep} \right)^2}{2 \cdot \sigma_{nep}^2} \right) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Observar que T não resulta log-normal. Para detalhar esse fato, fazemos a transformação passo a passo:

$$T' = \frac{1}{\gamma}$$

e

$$f_{T'}(t') = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_{nep} \cdot t'} \cdot \exp \left(- \frac{(\ln(t') + m_{nep})^2}{2 \cdot \sigma_{nep}^2} \right)$$

que é log-normal, em seguida:

$$T'' = \frac{W}{R} \cdot T'$$

e

$$f_{T''}(t'') = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_{nep} \cdot t''} \cdot \exp \left(-\frac{(\ln(t'') - \ln(W/R) + m_{nep})^2}{2 \cdot \sigma_{nep}^2} \right)$$

que também é log-normal, e finalmente:

$$T''' = T'' + 1$$

e, portanto:

$$f_{T'''}(t''') = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_{nep} \cdot (t''' - 1)} \cdot \exp \left(-\frac{(\ln(t''' - 1) - \ln(W/R) + m_{nep})^2}{2 \cdot \sigma_{nep}^2} \right)$$

que não é log-normal.

Se fizermos a última etapa, a inversão da variável, obtemos de novo $f_T(t)$. Essa última etapa é análoga à primeira, que, como vimos, gerou uma distribuição log-normal. Com isso, podemos concluir que a densidade de probabilidade de T não é log-normal devido à transformação $T''' = T'' + 1$. Se a média de T'' em neper é bem maior que 1, podemos aproximar T''' (e T) pela log-normal T'' .

Entretanto, de modo geral, utilizaremos uma aproximação log-normal em nossos cálculos, da seguinte maneira:

1. calcularemos numericamente a média e variância de T :

$$m_T = \int_{-\infty}^{\infty} T \cdot f_T(T) \cdot dT$$

$$\sigma_T^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (T - m_T)^2 \cdot f_T(T) \cdot dT$$
(4.15)

e vamos admiti-la log-normal.

2. calcularemos a média e desvio da distribuição normal aproximada de T, em neper, usando [Alme98]:

$$m_{T_{nep}} = \ln \left(\frac{m_T^2}{\sqrt{m_T^2 + \sigma_T^2}} \right)$$

$$\sigma_{T_{nep}} = \sqrt{\ln \left(\frac{\sigma_T^2}{m_T^2} + 1 \right)}$$
(4.16)

que resulta a partir das relações:

$$E(T^r) = E(e^{r \cdot T_{nep}}) = \exp \left(r \cdot m_{T_{nep}} + \frac{1}{2} \cdot r^2 \cdot \sigma_{T_{nep}}^2 \right)$$

$$e$$

$$\sigma_T^2 = E(T^2) - E^2(T)$$
(4.17)

e de:

$$m_T = \exp \left(m_{T_{nep}} + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{T_{nep}}^2 \right)$$

$$\sigma_{T_{nep}}^2 = \exp \left(2 \cdot m_{T_{nep}} + \sigma_{T_{nep}}^2 \right) \cdot (\exp(\sigma_{T_{nep}}^2) - 1)$$
(4.18)

3. escreveremos:

$$f_T(t) \approx \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_{T_{nep}} \cdot t} \cdot \exp \left(-\frac{(\ln(t) - m_{T_{nep}})^2}{2 \cdot \sigma_{T_{nep}}^2} \right) \quad (4.19)$$

Dessa forma, determinamos como representar as distribuições dos termos individuais que aparecem na expressão de capacidade e constituem a variável aleatória V.

A seguir discutiremos como calcular os somatórios de termos individuais log-normais.

A função densidade de probabilidade da soma de duas variáveis aleatórias independentes é a convolução das funções densidade de probabilidade individuais. Para distribuições normais, a função característica é utilizada para resolver o problema [Fent60]. Entretanto, não se conhece a função característica de log-normais e o problema, nesse caso, requer convolução numérica.

Através de resultados apresentados em [Fent60], e das próprias convoluções numéricas, mostra-se que a soma de variáveis aleatórias log-normais resulta uma variável que pode ser aproximada como log-normal.

Nosso objetivo é discutir como caracterizar de forma aproximada a distribuição da variável-soma (exata), sem recorrer à convolução numérica. Apesar de

extensamente discutido, esse problema não tem uma solução fechada. Procuraremos uma distribuição log-normal tal que alguns de seus momentos sejam iguais aos correspondentes da variável-soma. Em particular, estamos interessados nos dois primeiros momentos, média e variância, que aproximam as distribuições para valores intermediários das variáveis. Conforme descrito em [Fent60], para valores extremos deveríamos utilizar o segundo, terceiro e até quarto momentos.

Para determinar os dois primeiros momentos, há diversos métodos, dentre os quais estudamos dois, conforme segue, diferentemente do realizado em [Ram98a].

Consideremos T_1, T_2, \dots, T_N , N variáveis log-normais independentes e idênticas a T , já definido, e Y_1, Y_2, \dots, Y_N e Z , normais.

A aproximação log-normal significa que:

$$L = T_1 + T_2 + \dots + T_N = e^{Y_1} + e^{Y_2} + \dots + e^{Y_N} = e^Z \quad (4.20)$$

O primeiro método estudado é o clássico método de Wilkinson [Fent60], que consiste em supor L log-normal, calcular a média e variância de $T_1+T_2+\dots+T_N$ através das relações seguintes, e igualar esses dois momentos de L e $T_1+T_2+\dots+T_N$. Calcula-se a média e variância de $T_1+T_2+\dots+T_N$ (e de L) através de:

$$m_L = \sum_{i=1}^N m_{T_i} = m_{T_1} + m_{T_2} + \dots + m_{T_N} \quad (4.21)$$

$$\sigma_L^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_{T_i}^2 = \sigma_{T_1}^2 + \sigma_{T_2}^2 + \dots + \sigma_{T_N}^2$$

ou seja, somatórios das médias e variâncias lineares das log-normais.

A densidade de probabilidade log-normal da variável L pode ser escrita calculando-se a média e o desvio padrão da normal Z, como já apresentado.

O outro método estudado é o de Schwartz e Yeh, proposto em [Schw82] e utilizado em [Ram98a]. Ele também aproxima a variável-soma por uma variável log-normal e calcula, de forma exata, sua média e desvio padrão para um somatório de dois termos. Os valores para somatórios com número de termos maior que dois são calculados recursivamente, utilizando-se o primeiro resultado.

Consideremos o caso com dois termos:

$$L = T_1 + T_2 = e^{Y_1} + e^{Y_2} = e^Z$$

ou

$$Z = \ln(e^{Y_1} + e^{Y_2})$$

Definindo uma nova variável gaussiana:

$$W = Y_2 - Y_1 \quad (4.22)$$

temos:

$$m_W = m_{Y_2} - m_{Y_1}$$

$$\sigma_W^2 = \sigma_{Y_2}^2 + \sigma_{Y_1}^2$$

dados em neper. Então:

$$\begin{aligned} E(Z) &= E\{\ln(e^{Y_1} + e^{Y_2})\} = E\{\ln[e^{Y_1} \cdot (1 + e^{Y_2 - Y_1})]\} = \\ &= E(Y_1) + E[\ln(1 + e^W)] \end{aligned} \quad (4.23)$$

Através da expansão em série:

$$\ln(1+x) = \sum_{j=1}^{\infty} C_j \cdot x^j, \quad C_j = \frac{(-1)^{j+1}}{j} \quad (4.24)$$

e, escolhendo apropriadamente os sub-intervalos de integração que garantam convergência, calculamos:

$$E[\ln(1 + e^W)] = \int_{-\infty}^{\infty} [\ln(1 + e^W)] \cdot f_W(w) \cdot dW$$

aplicando a série proposta e calculando a média. Resulta:

$$E(Z) = m_Z = m_{Y_1} + G_1(\sigma_W, m_W) \quad (4.25)$$

onde G_1 depende apenas dos parâmetros de W .

Para calcular a variância de Z , fazemos:

$$\sigma_Z^2 = E(Z^2) - m_Z^2 = E\{[Y_1 + \ln(1 + e^W)]^2\} - m_Z^2$$

onde:

$$E(Z^2) = E\{[Y_1 + \ln(1 + e^W)]^2\} = \sigma_{Y_1}^2 + m_{Y_1}^2 + E[2 \cdot Y_1 \cdot \ln(1 + e^W)] + E[\ln^2(1 + e^W)] \quad (4.26)$$

e para os dois últimos termos de $E(Z^2)$, usaremos expansões em série. O primeiro deles, cruzado, tem coeficiente de correlação dado por:

$$\rho = -\frac{\sigma_{Y_1}}{\sigma_W} = -\frac{\sigma_{Y_1}}{\sqrt{\sigma_{Y_1}^2 + \sigma_{Y_1}^2}} \quad (4.27)$$

As séries utilizadas nessa etapa são:

$$\ln^2(1+x) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cdot x^{k+1} \quad , \quad b_k = \frac{2 \cdot (-1)^{k+1}}{k+1} \cdot \sum_{j=1}^k j^{-1}$$

$$\frac{x}{1+x} = \frac{e^W}{1+e^W} = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \cdot e^{(k+1) \cdot W}$$

Maiores detalhes do desenvolvimento desses cálculos podem ser encontrados em [Schw82].

Observar que em todas as expansões em séries propostas:

$$|x| < 1$$

e, portanto, no nosso caso:

$$e^W < 1 \Leftrightarrow W < 0$$

Então, devemos escolher em que sequência tomar as variáveis Y , para que:

$$W = Y_2 - Y_1 < 0 \quad (4.28)$$

Desenvolvendo os cálculos, resulta:

$$\sigma_Z^2 = \sigma_{Y_1}^2 - G_1^2(\sigma_W, m_W) - 2 \cdot \rho^2 \cdot G_3(\sigma_W, m_W) + G_2(\sigma_W, m_W) \quad (4.29)$$

A seguir mostramos graficamente o comportamento das funções G em função de σ_W (dB) e m_W (dB).

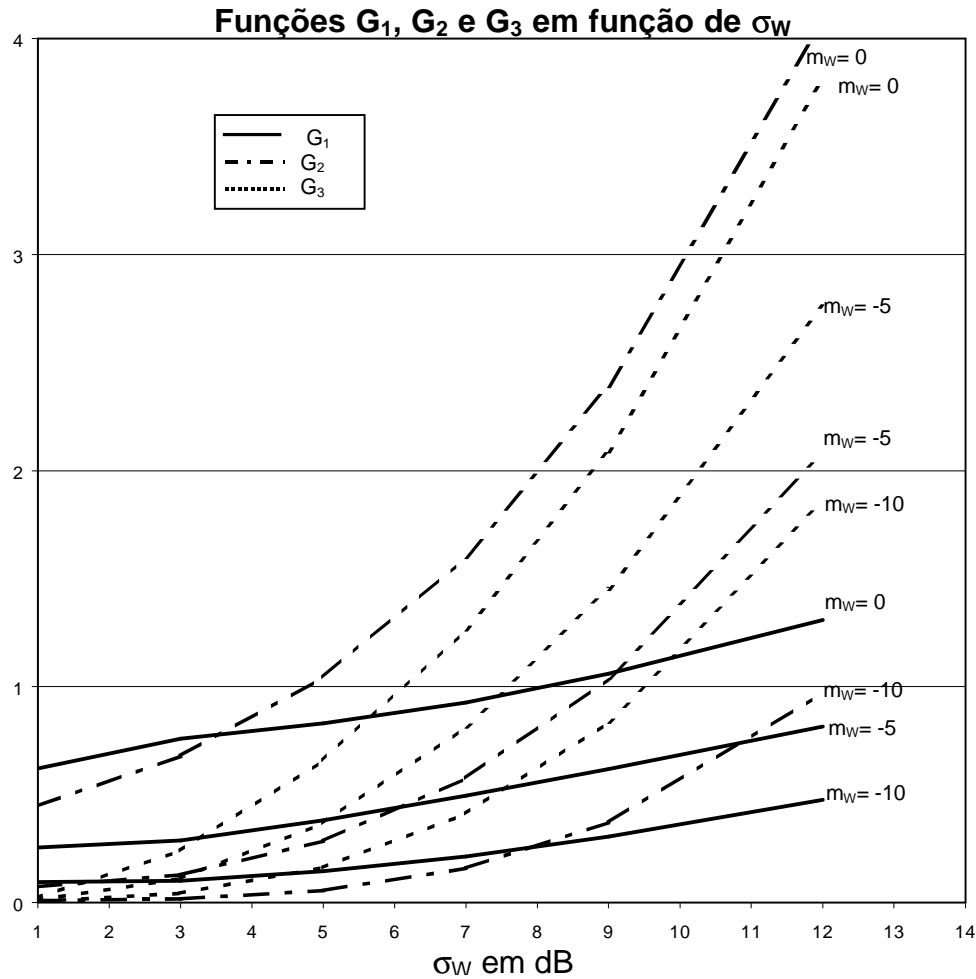


Gráfico 4.1: Funções G do método de Schwartz & Yeh

Na prática, não utilizamos esse gráfico para extrair os valores das funções G , mas polinômios de baixa ordem que aproximam as curvas, apresentados em [Schw82], e que podem ser obtidos pelo método dos mínimos quadrados.

Consideraremos valores de σ , desvio padrão das variáveis aleatórias γ , em dB, na faixa de 0 a 2 dB. Esses valores estão de acordo com os apresentados em [Hash98], que variam de 0,33 a 2,20, dependendo da velocidade do móvel e do

número de multi-percursos no desvanecimento tipo Rayleigh e ainda correspondem aos utilizados em [Ram98b].

Essa faixa de valores de σ resulta valores de desvios padrão das variáveis T , transformadas a partir de γ , calculados da seguinte maneira:

$$m_T = \int_{-\infty}^{\infty} T \cdot f_T(T) \cdot dT = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_{nep} \cdot (1-T)}} \cdot \exp \left(-\frac{\left(\ln \left(\frac{W}{R} \cdot \frac{T}{1-T} \right) - m_{nep} \right)^2}{2 \cdot \sigma_{nep}^2} \right) \cdot dT \quad (4.30)$$

$$\sigma_T^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (T - m_T)^2 \cdot f_T(T) \cdot dT = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(T - m_T)^2}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_{nep} \cdot T \cdot (1-T)}} \cdot \exp \left(-\frac{\left(\ln \left(\frac{W}{R} \cdot \frac{T}{1-T} \right) - m_{nep} \right)^2}{2 \cdot \sigma_{nep}^2} \right) \cdot dT \quad (4.31)$$

onde m_{nep} e σ_{nep} são a média e o desvio de γ em neper. Essas integrais, calculadas numericamente, resultam:

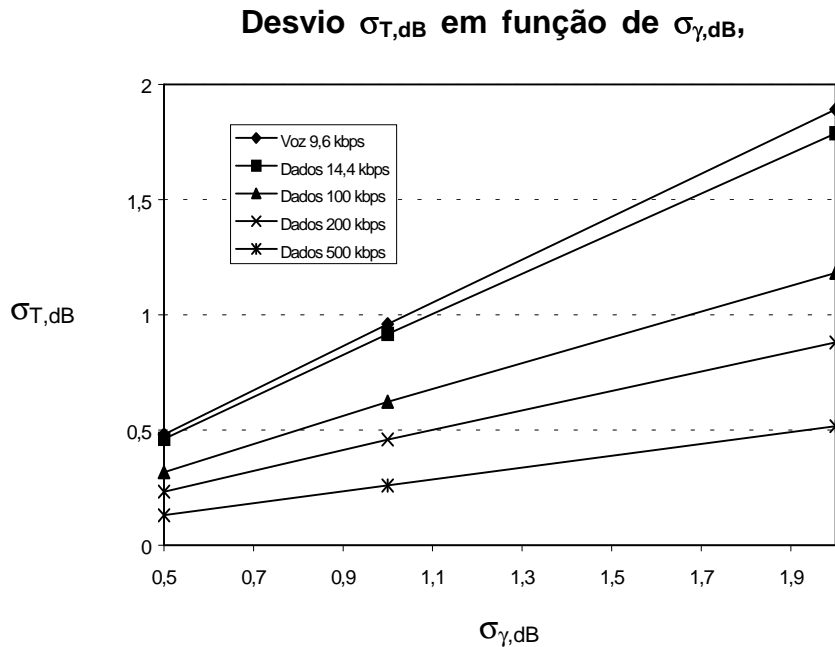


Gráfico 4.2: Desvio da variável T em função de σ

As variáveis T dependem das taxas, como pode ser verificado em suas expressões de densidades de probabilidade. Seus desvios padrão dependem das taxas, de maneira inversa. Para a menor taxa, que corresponde à Classe 1, os desvios de T variam aproximadamente de 0 a 2 dB, praticamente no mesmo intervalo dos valores de desvio de γ . Portanto esse é o nosso intervalo de interesse.

A seguir, faremos uma comparação dos dois métodos de cálculo da soma de log-normais apresentados, afim de escolhermos o mais apropriado para utilização no intervalo de desvios de interesse, conforme determinado anteriormente.

Como comparação, determinamos, através de simulação de Monte Carlo, os valores de desvio para um somatório do tipo:

$$\sum_k \frac{1}{\frac{1230}{9,6 \cdot \text{Random}[\gamma]} + 1}$$

fixada a banda e a taxa em 1230 kHz e 9,6 kbps, respectivamente, e em função dos parâmetros da variável γ , definida como log-normal, com média 7 dB e desvios variando de 0,5 a 4 dB.

Fizemos k , o número de termos a serem somados, variar de 2 a 30 e realizamos cada somatório 1.000 vezes. Calculamos o desvio padrão dos valores obtidos e verificamos, através de histograma, que se trata de uma

distribuição aproximadamente log-normal de valores. Nos gráficos a seguir, comparamos os resultados dos métodos, para desvios de 0,5; 2 e 4 dB.

Comparação dos desvios dos Somatórios de Log-normais

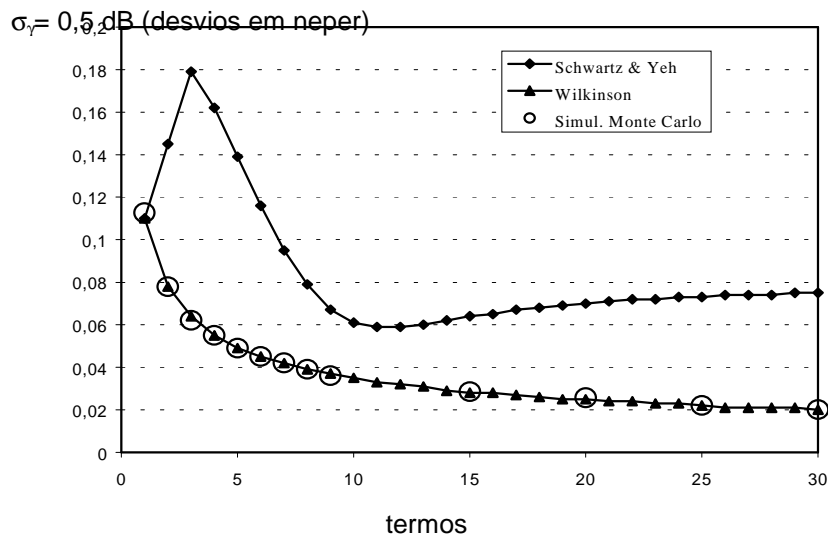


Gráfico 4.3: Valores de desvio calculados e simulados, $\sigma=0,5 \text{ dB}$

Comparação dos desvios dos Somatórios de Log-normais

$\sigma_r = 2 \text{ dB}$ (desvios em neper)

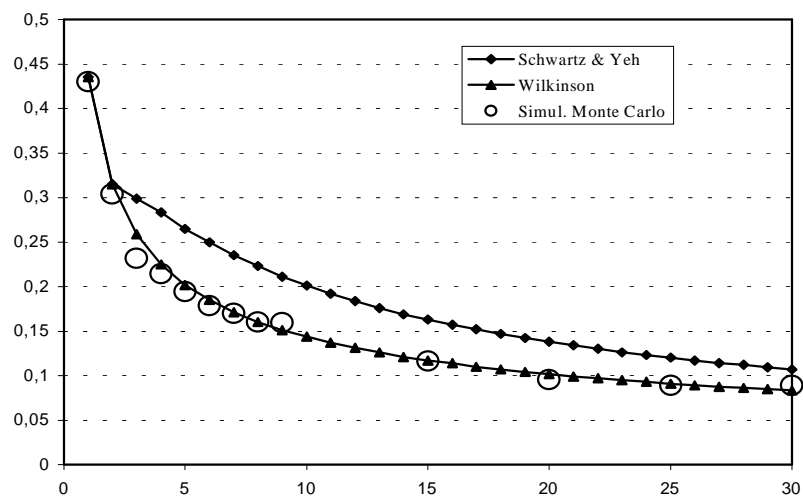


Gráfico 4.4: Valores de desvio calculados e simulados, $\sigma=2 \text{ dB}$

Comparação dos desvios dos Somatórios de Log-normais $\sigma_\gamma = 4$ dB (desvios em neper)

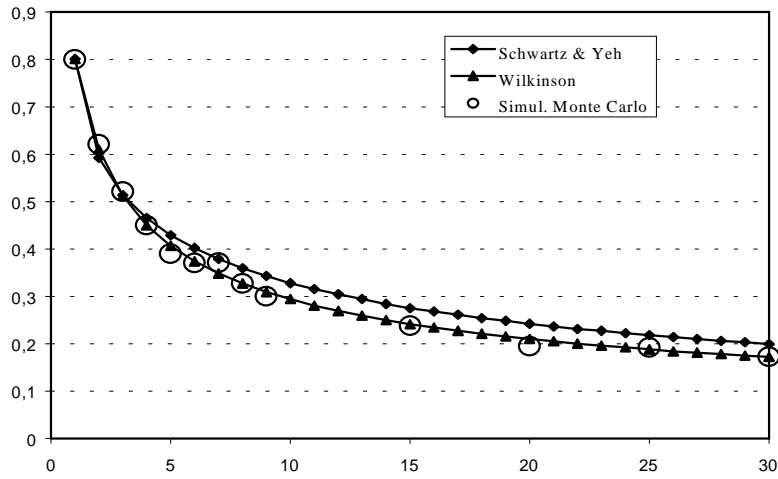


Gráfico 4.5: Valores de desvio calculados e simulados, $\sigma=4$ dB

Concluimos, através dos gráficos, que o método de Schwartz & Yeh não apresenta bom comportamento para valores de σ menores do que 4 dB, e, portanto, Wilkinson continua sendo o mais apropriado nessa faixa. Conforme discutido em [Schw82], para valores de desvio maiores que 4 dB, Wilkinson não apresenta bons resultados, mas isso não afetará nosso cálculo. Wilkinson também apresenta a vantagem de uma implementação mais simples. Uma comparação envolvendo alguns outros métodos pode ser encontrada em [Beau94].

Uma vez caracterizados os termos individuais e os somatórios da variável V :

$$V = \sum_{i=1}^{N_1} \frac{1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_i^{(1)}} + 1} + \sum_{i=1}^{N_2} \frac{1}{\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_i^{(2)}} + 1}$$

podemos concluir que V também é aproximadamente log-normal.

Com controle imperfeito de potência, a expressão de capacidade deve ser satisfeita pelo menos 99% do tempo, ou seja:

$$P(V \leq 1) = 1 - \eta \geq 0,99$$

onde η é a probabilidade de não-atendimento.

Resolver o problema de otimização de “throughput”, buscando os máximos valores de taxa para uma configuração de usuários dada, obviamente, corresponde à igualdade, ou seja:

$$P(V \leq 1) = \int_0^1 f_V(v) \cdot dV = 0,99 \quad (4.32)$$

Nesse capítulo também consideraremos dois modos de transmissão, conforme já descrito:

- Modo 1 – transmissão convencional

Todos os usuários podem transmitir a qualquer instante.

- Modo 2 – transmissão em modo “scheduling”

As transmissões dos usuários Classe 2 são programadas no tempo de modo que a cada instante apenas uma parcela deles, $k_2 < N_2$ usuários, transmitam à taxa R_2^* , enquanto os demais $(N_2 - k_2)$ mantêm sincronismo, à taxa constante R_0 .

Definimos, analogamente à V , a variável V^* :

$$V^* = \sum_{i=1}^{N_1} \frac{1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_i^{(1)}} + 1} + \sum_{i=1}^{k_2} \frac{1}{\frac{W}{R_2^* \cdot \gamma_i^{(2)}} + 1} + \sum_{i=1}^{N_2-k_2} \frac{1}{\frac{W}{R_0 \cdot \gamma_i^{(2)}} + 1} \quad (4.33)$$

que também é log-normal e corresponde ao modo “scheduling”.

Nesse modo também deve valer:

$$P(V^* \leq 1) = \int_0^1 f_{V^*}(v^*) \cdot dV^* = 0,99 \quad (4.34)$$

Nessas condições, calcularemos numericamente os valores máximos de R_2 e R_2^* para algumas configurações e os valores máximos de “throughput” no modo “scheduling”, T , e ganho G , conforme definidos no capítulo anterior.

O problema de capacidade agora tem as seguintes variáveis: N_1 , N_2 , r_1 , R_2 , σ_1 e σ_2 . Em cada cenário, partiremos de cinco variáveis conhecidas e calcularemos a última, que determina aquela configuração.

Normalmente, a população de usuários de voz, N_1 e a taxa de voz, r_1 , são conhecidas. Obteremos soluções parametrizadas em função dos desvios padrão, que serão variados entre 0,5; 1; 1,5 e 2 dB.

Variamos N_2 de 1 a $N_{2,\max}$ do caso de controle perfeito, calculado conforme capítulo anterior.

4.3 Resultados Numéricos

Parâmetro	Símbolo	Valor
largura de banda	W	1,23 MHz
Classe 1		
taxa de bits	r_1	9,6 kbps
QoS:		
Média	$m_{\gamma 1}$	7 dB (5)
desvios padrão	$\sigma_{\gamma 1}$	0,5; 1; 1,5; 2 dB
Classe 2		
taxa de bits mínima	r_2	14,4 kbps
QoS:		
Média	$m_{\gamma 2}$	8,5 dB (7,0795)
desvios padrão	$\sigma_{\gamma 2}$	0,5; 1; 1,5; 2 dB
Usuários simultâneos (Classe 2)	k_2	1
Taxa de sincronismo	R_0	1,2 kbps

Tabela 4.1: Especificações do Sistema com Controle Imperfeito de Potência

“Throughputs” em Modos Convencional e “Scheduling” vs. σ

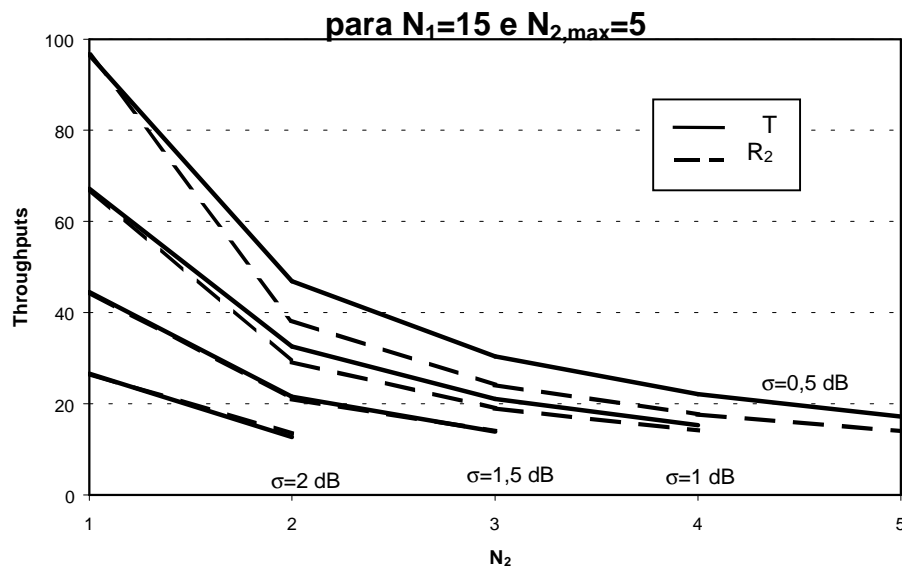


Gráfico 4.6: “Throughputs” (em kbps) obtidos para $N_1=15$ e controle imperfeito de potência

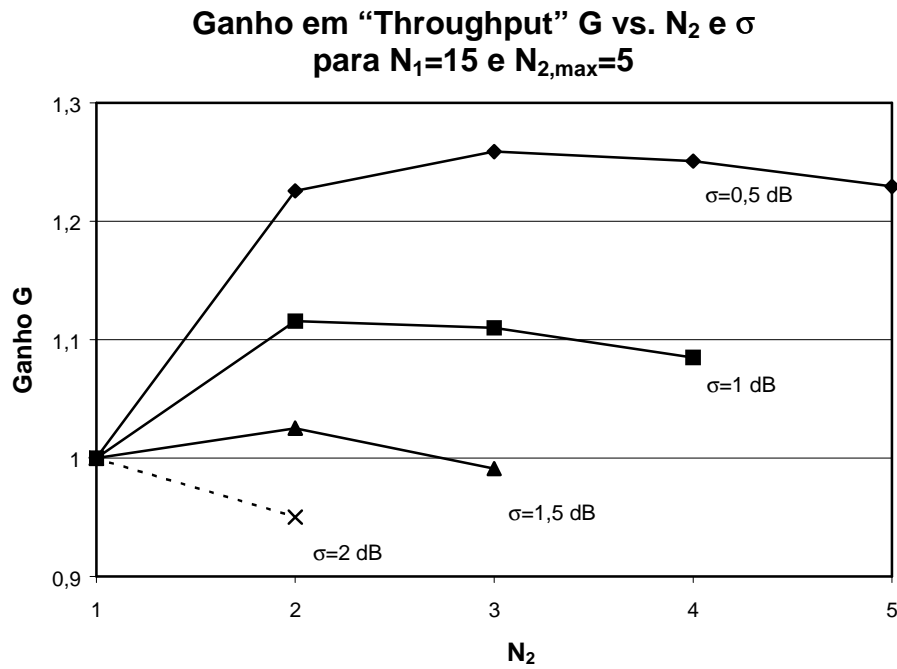


Gráfico 4.7: Ganhos obtidos para $N_1=15$ e controle imperfeito de potência

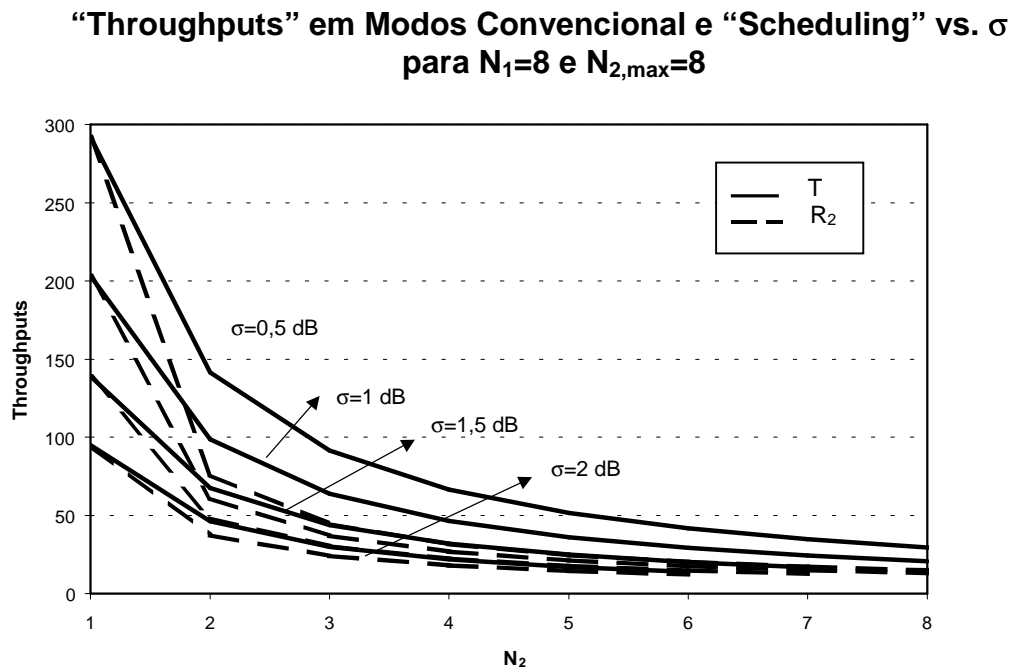


Gráfico 4.8: “Throughputs” (em kbps) obtidos para $N_1=8$ e controle imperfeito de potência

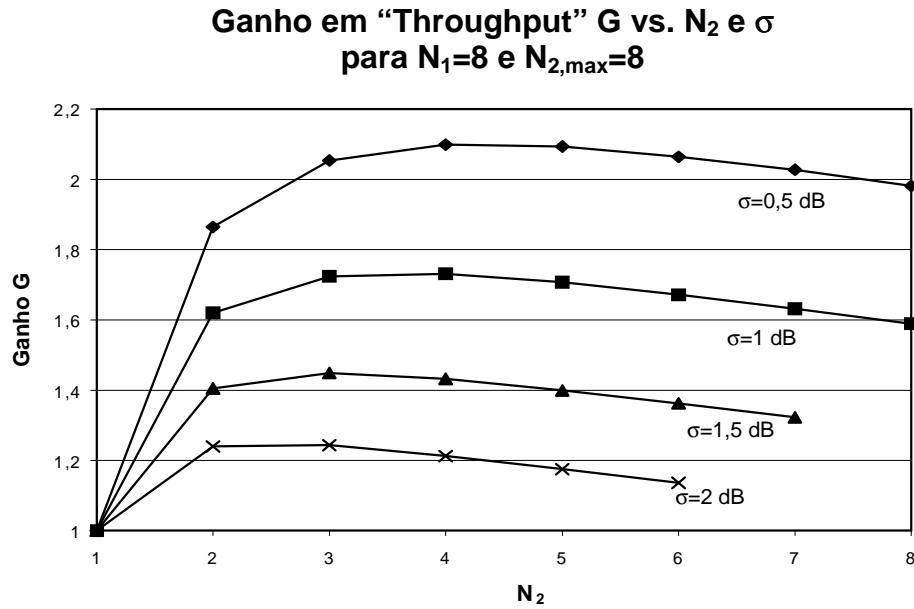


Gráfico 4.9: Ganhos obtidos para $N_1=8$ e controle imperfeito de potência

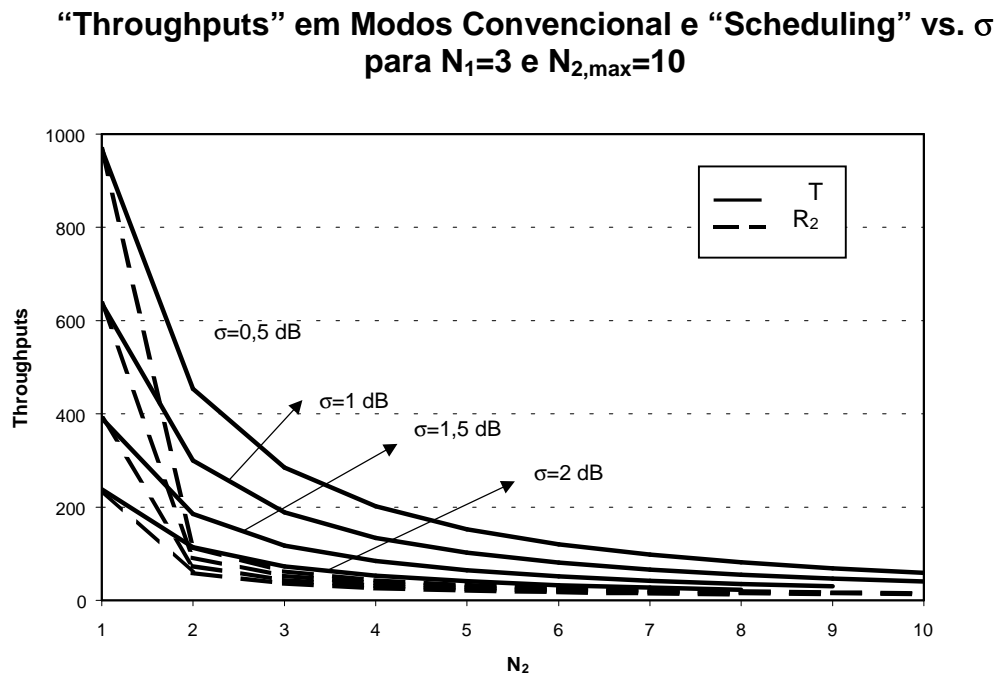


Gráfico 4.10: “Throughputs” obtidos para $N_1=3$ e controle imperfeito de potência

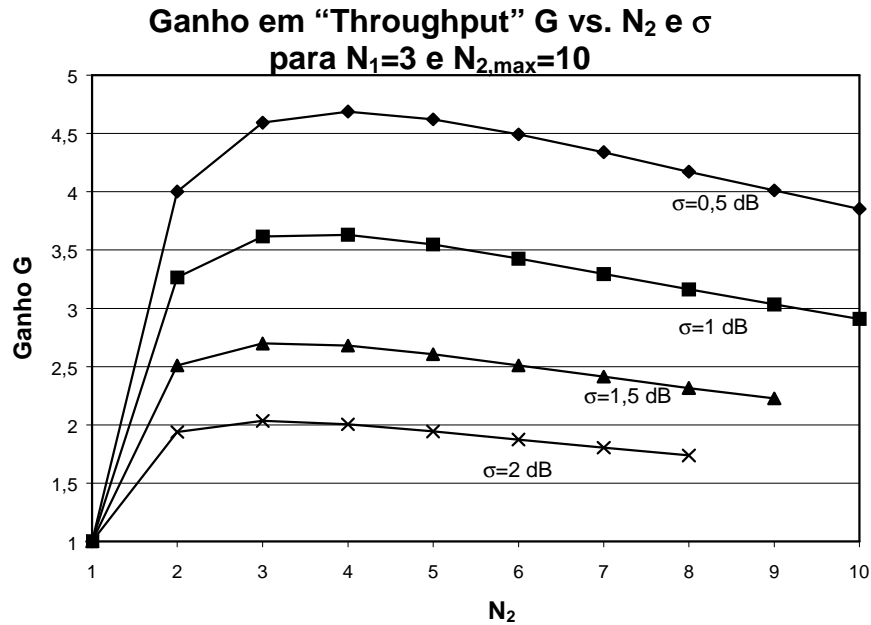


Gráfico 4.11: Ganhos obtidos para $N_1=3$ e controle imperfeito de potência

Observamos, primeiramente, que a comparação, através de simulação de Monte Carlo, de dois métodos de cálculo da soma de variáveis aleatórias com distribuições log-normais nos permitiu resolver o problema utilizando um método diferente do empregado em [Ram98a].

Como se observa nas figuras, a imperfeição no controle de potência afeta significativamente os ganhos de “scheduling”, uma vez que a potência própria e a interferência MAI variam. Apesar disso, os resultados são qualitativamente muito semelhantes aos obtidos no caso ideal e ainda pode-se observar ganhos expressivos para populações de usuários de voz mais reduzidas.

5.

MAXIMIZAÇÃO DE “THROUGHPUT” E “SCHEDULING” EM SISTEMAS CDMA MULTI- TAXAS MULTI-CELULARES E COM LIMITAÇÃO DAS POTÊNCIAS MÁXIMAS DE TRANSMISSÃO

No capítulo 2, modelamos a capacidade máxima e o número máximo de usuários de um sistema multi-taxas, que podem ser obtidos fazendo uso de controle perfeito de potência.

No capítulo 3, resolvemos o problema de maximização de taxas para a solução de potências mínimas, considerando uma célula isolada (caso uni-celular). Nessa condição, e sem restringir as potências de transmissão, o ruído *AWGN* pôde ser desprezado e a expressão de capacidade, simplificada.

Neste capítulo, damos continuidade ao que foi desenvolvido no capítulo 2, estendendo os resultados para o caso real, multi-celular. Consideraremos, entretanto, controle perfeito de potência, uma vez que a abordagem de controle imperfeito já foi apresentada no capítulo 4.

No caso multi-celular, cada célula CDMA sofre também interferência dos sinais das estações móveis de células vizinhas. Como sabemos, a capacidade do sistema CDMA é sempre limitada por interferência, ou seja, pela recepção de um determinado nível relativo de potência originada em fontes que não são as de interesse.

Como nos casos anteriores, dadas as expressões de E_b/I_0 , fixadas as perdas de percurso (vetor \mathbf{h}) e as especificações de N usuários, não há mais de um único vetor \mathbf{P} que é solução. Ele existirá somente se a configuração proposta não exceder a capacidade máxima da célula. Esse vetor é determinado pelos níveis de ruído *AWGN* e interferência externa, número de usuários e especificações de taxa e QoS. Atendendo aos requisitos mínimos dos usuários

com igualdade, a solução corresponde à de potência total mínima, e ao controle perfeito de potência.

No caso multi-celular, as potências atribuídas na célula e o nível de interferência externa (que é função das potências atribuídas nas células vizinhas) se ajustam para a configuração dada, de modo a convergir para uma solução, se existir.

As soluções de potências ainda estão sujeitas à limitações de máxima potência de transmissão instantânea, que discutiremos mais adiante.

No caso multi-celular, as expressões de E_b/I_0 são:

$$\frac{W}{R_i} \cdot \frac{h_i \cdot P_i}{\sum_{j \neq i} h_j \cdot P_j + (\eta_0 + I_E) \cdot W} = \gamma_i \quad (5.1)$$

onde I_E é a densidade espectral de potência da interferência originada em outras células e $I_E + \eta_0 = I_T$.

Com a inclusão do termo I_E na expressão de E_b/I_0 , observamos uma redução do número efetivo de usuários (ou do desempenho dos usuários) que a célula em questão poderá suportar. Logo, a capacidade no ambiente multi-celular diminui em relação à uni-celular, devido às fontes de interferência externa, como será apresentado.

Essa expressão vale para todos os usuários de todas as células do sistema, e, resolvida para R e γ mínimos, resulta a solução de potência total mínima. Para M células e N_i usuários por célula, existem $M \cdot N_i$ equações e $M \cdot N_i$ incógnitas, uma vez que as interferências podem ser escritas em função das potências externas. Logo, o sistema tem uma única solução em \mathbf{P} , que existirá somente se a configuração for admissível.

Configurações admissíveis devem atender à seguinte expressão de capacidade da célula:

$$\sum_{j=1}^N \frac{1}{\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1} = 1 - \frac{(I_E + \eta_0) \cdot W}{\left(\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot h_i \cdot P_i^*} \quad (5.2)$$

Além disso, existem limitações de potências máximas de transmissão:

$$P_k \leq p_k$$

O que equivale, para uma configuração de usuários, a:

$$hP_k \leq h_{\min,k} \cdot p_k \quad (5.3)$$

onde $h_{\min,k}$ corresponde à maior distância entre um usuário à mesma taxa e a rádio base.

Isso apenas significa que a potência do usuário mais distante não deve exceder o valor máximo permitido.

Observar que à medida que aumenta hP , para p fixo, h_{\min} precisa aumentar, ou seja, diminuir o raio de cobertura. Isso não é desejável, e portanto, a taxa deve ser limitada.

O problema, levando em conta as duas condições, pode ser escrito como:

$$\sum_{j=1}^N \frac{1}{\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1} = 1 - \frac{(I_E + \eta_0) \cdot W}{\left(\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot h_i \cdot P_i} \quad (5.4)$$

$$P_i = \frac{(I_E + \eta_0) \cdot W}{\left(\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot h_i \cdot \left[1 - \sum_{j=1}^N \frac{1}{\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1} \right]} \leq p_i, \quad i = 1, 2, \dots$$

Essas condições devem valer para todos os usuários das células. Suponha que é possível calcular I_E . Para populações de usuários, requisitos mínimos de taxa e QoS, perdas de percurso e ruído *AWGN* dados para todo o sistema, podemos resolver o problema iterativamente: iniciar verificando a viabilidade da configuração com taxas mínimas (a configuração só é viável se não ultrapassar a capacidade máxima nas células, dada pela primeira expressão, e ainda se não resultar em potências maiores que os limites, dados pela segunda); se a configuração com taxas mínimas for possível, podemos imaginar um novo problema de potência total “mínima”, agora com taxas “mínimas” maiores e tentar resolver novamente. Incrementando as taxas e resolvendo, estaremos obtendo novas soluções de potências mínimas, que vão se elevando. Essas interações podem ser feitas até que a potência de um

usuário qualquer não possa aumentar mais ou a ocupação do sistema esteja em seu máximo.

Não determinaremos a população máxima a taxas mínimas, mas, diretamente, as taxas máximas para uma população dada. Esses problemas são totalmente equivalentes.

Como vimos, podemos escrever:

$$h_i P_i = \frac{(I_E + \eta_0) \cdot W}{\left(\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot \left[1 - \sum_{j=1}^N \frac{1}{\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1} \right]} \leq h_{\min,i} \cdot p_i$$

onde $h_i P_i$ é a solução de potência para uma determinada taxa, e $h_{\min,i}$ corresponde ao usuário mais distante da rádio base à mesma taxa. Uma vez que as soluções de potências mínimas seguem controle de potência, a condição acima vale para todos os usuários que estejam a uma mesma taxa; em particular, estamos interessados no mais distante, para o qual a potência de transmissão é maior.

Utilizando o resultado de controle de potência, podemos escrever:

$$h_i P_i \cdot \left(\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) = \frac{(I_E + \eta_0) \cdot W}{\left[1 - \sum_{j=1}^N \frac{1}{\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1} \right]} \Rightarrow \text{constante p/ configuração dada}$$

e

(5.5)

$$\begin{cases} h_i P_i \leq h_{\min,i} \cdot p_i, \\ h_i P_i \cdot \left(\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \leq h_{\min,j} \cdot p_j \cdot \left(\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1 \right), \\ h_i P_i \cdot \left(\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \leq h_{\min,k} \cdot p_k \cdot \left(\frac{W}{r_k \cdot \gamma_k} + 1 \right), \\ \vdots \end{cases}$$

Essas expressões relacionam a potência de um usuário com as limitações de potência própria e de todos os outros, ponderando os termos pelas taxas.

Logo, a condição resultante é:

$$h_i P_i \cdot \left(\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \leq \min \left\{ h_{\min,h} \cdot p_h \cdot \left(\frac{W}{r_h \cdot \gamma_h} + 1 \right) \right\}$$

(5.6)

e o termo do lado direito é denominado de usuário mais limitado. Como vimos, as soluções de todos os usuários da célula estão limitadas pelo termo mais restritivo (e, portanto, o desempenho depende desse termo).

Na resolução iterativa do problema que havíamos proposto para determinar as taxas máximas, o usuário mais limitado atingirá a condição limite primeiro, e, portanto, transmitirá à sua potência máxima. Logo, vale:

$$\sum_{j=1}^N \frac{1}{\frac{W}{r_j \cdot \gamma_j} + 1} = 1 - \frac{(I_E + \eta_0) \cdot W}{\min \left\{ h_i \cdot p_i \cdot \left(\frac{W}{r_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \right\}} \quad (5.7)$$

Supomos que as limitações de potência são tais que as soluções de máxima taxa se limitam pela potência máxima do usuário mais limitado. Essa solução limite ainda é de mínima potência total, para requisitos de taxa mais elevados. Supomos, ainda, que o usuário mais restritivo é de Classe 2, a taxa variável.

A intensidade das interferências externas depende das potências de transmissão dos móveis interferentes e das distâncias de cada um deles à rádio base que estamos analisando. As potências de transmissão interferentes, por sua vez (vetor **P** da célula vizinha) dependem da distância de cada móvel à rádio base que o atende, dos níveis de ruído e interferência naquela célula e da ocupação da mesma (supondo também controle perfeito de potência).

Observar que, no controle de potência, à medida que a estação móvel está mais distante da rádio base que a atende, a rádio base aumenta a potência de transmissão do móvel. Ao mesmo tempo, porém, esse móvel (mais distante da sua rádio base) está mais próximo de uma rádio base vizinha, e, uma vez transmitindo à potência elevada, representa uma considerável fonte de interferência para a última. Podemos esperar, portanto, um impacto considerável de perda de capacidade no ambiente multi-células, como será mostrado adiante.

Como mencionado, no caso prático, os móveis estão limitados em suas potências máximas de transmissão, por uma restrição do próprio terminal que tem uma ERP máxima. Essa condição havia sido desconsiderada no capítulo 3, o que permitiu simplificar a expressão de capacidade. Podemos desconsiderá-la, ainda, porque estávamos analisando o caso uni-celular.

A seguir, estenderemos os resultados obtidos em [Ram98a] e obteremos resultados que nos permitirão justificar as seguintes conclusões, até esse ponto intuitivas:

- potências de transmissão e interferência externa se ajustam de modo que a capacidade máxima do sistema não se altera (densidade de usuários servidos varia), a menos de um termo proporcional ao ruído *AWGN*, que pode ser mais representativo à medida que as próprias potências diminuem.
- Desprezando-se o ruído, no caso homogêneo, limitações de potência iguais para todas as células não inviabilizariam um desempenho desejado, pois trata-se de problema geométrico que não muda (apenas varia em “escala”). Mas, no caso de potências limitadas, o ruído não pode ser desprezado.

A seguir calcularemos a interferência externa.

5.1 Cálculo de Interferência externa

A extensão da modelagem para o caso multi-celular depende de determinarmos a interferência externa.

Assim, descreveremos o problema de calcular a interferência que uma célula causa em outra, através do exposto em [Kim93].

Consideremos duas células circulares de raio R , com as rádio bases afastadas de uma distância d , e uma população de N usuários na célula interferente, distribuídos uniformemente na área.

A densidade de usuários na célula interferente, portanto, vale:

$$\rho = \frac{N}{\pi \cdot R^2} \quad (\text{usuários/m}^2) \quad (5.8)$$

Considerando controle perfeito de potência, a potência recebida na rádio base interferente, proveniente de todos os seus usuários, é a mesma, igual a $h.P$. Consideraremos, ainda, um fator de atividade de voz α . Admitindo a perda de percurso como sendo proporcional à quarta potência das distâncias de cada usuário às rádio bases, ver figura 5.1, vale:

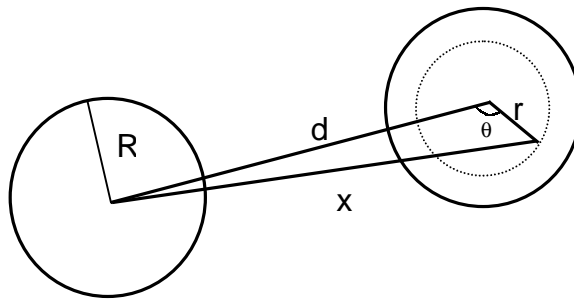


Figura 5.1: Geometria para cálculo da interferência inter-células

$$P_E(d) = \int_0^{2\pi} \int_0^R \alpha \cdot h \cdot P \cdot \frac{r^4}{x^4} \cdot \rho \cdot dA \quad (5.9)$$

onde $P_E(d)$ é a interferência total recebida da célula vizinha.

Observando a figura, e aplicando a lei dos cossenos, obtemos:

$$x = \sqrt{d^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot d \cdot \cos(\theta)}$$

Substituindo em $P_E(d)$, temos:

$$\begin{aligned} P_E(d) &= 2 \cdot \int_0^\pi \int_0^R \alpha \cdot h \cdot P \cdot \frac{r^4}{x^4} \cdot \frac{N}{\pi \cdot R^2} \cdot r \cdot dr \cdot d\theta = \\ &= \frac{2 \cdot \alpha \cdot N \cdot h \cdot P}{\pi \cdot R^2} \cdot \int_0^R r^5 \cdot dr \cdot \int_0^\pi \frac{d\theta}{(d^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot d \cdot \cos(\theta))^2} \end{aligned}$$

Esta integral é resolvida em [Kim93] e resulta:

$$P_E(d = k \cdot R) = 2 \cdot \alpha \cdot N \cdot h \cdot P \cdot \left[2 \cdot k^2 \cdot \ln\left(\frac{k^2}{k^2 - 1}\right) - \frac{4 \cdot k^4 - 6 \cdot k^2 + 1}{2 \cdot (k^2 - 1)^2} \right] \quad (5.10)$$

Em uma configuração multi-celular, como da figura 5.2, a seguir:

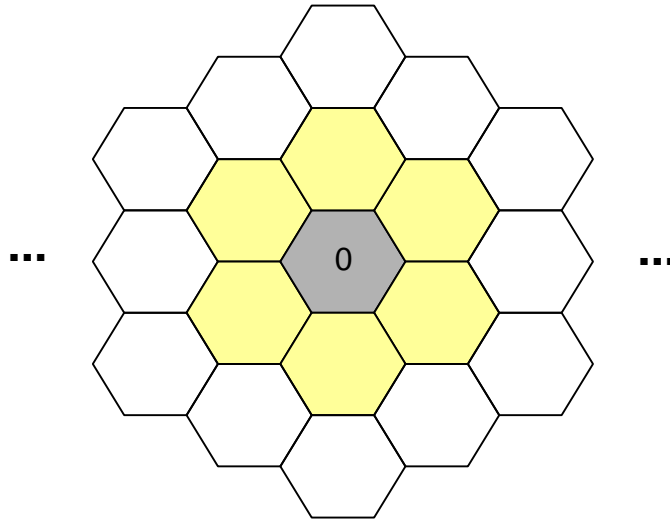


Figura 5.2: Configuração multi-celular

devemos calcular as interferências causadas na célula 0 devido a todas as células dos anéis vizinhos. No caso multi-taxas com duas classes de serviços, devemos considerar, em cada célula, os usuários de Classe 1 e 2 separadamente (por superposição). A interferência externa total vale:

$$P_{E, total} = \sum_{i=1}^6 (P_{E_1}(d_1) + P_{E_2}(d_1))_i + \sum_{i=1}^{12} (P_{E_1}(d_2) + P_{E_2}(d_2))_i + \sum_{i=1}^{18} (P_{E_1}(d_3) + P_{E_2}(d_3))_i + \dots \quad (5.11)$$

onde os P_E individuais são calculados conforme apresentado, supondo os usuários de cada classe distribuídos uniformemente. Para um “grid” de células circulares e idênticas, vale:

$$d_1 = 2 \cdot R; d_2 = 4 \cdot R; d_3 = 6 \cdot R; \dots$$

Observar que $P_{E, total} = I_E \cdot W$, onde I_E é a densidade espectral de potência da interferência externa, conforme capítulo 3.

- Perda de Capacidade

A seguir calcularemos a perda de capacidade devido à interferência externa, seguindo a idéia desenvolvida em [Kim93] ao definir eficiência de re-uso de frequências, mas adaptando a formulação para o caso de duas classes de usuários, fazendo a seguinte equivalência:

$$\frac{1}{\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_2} + 1} = \frac{N'_1}{\frac{W}{R_1 \cdot \gamma_1} + 1}$$

e, portanto, escrevendo toda a população em termos de uma das classes, à taxa R.

Considerando controle perfeito de potências, o E_b/I_0 para célula isolada, sem desprezar o ruído, vale:

$$\frac{E_b}{I_0} = \frac{W}{R} \cdot \frac{\alpha \cdot h \cdot P}{(N_{uni} - 1) \cdot \alpha \cdot h \cdot P + \eta_0 \cdot W} = \frac{W}{R} \cdot \frac{1}{(N_{uni} - 1) + \frac{\eta_0 \cdot W}{\alpha \cdot h \cdot P}}$$

O mesmo, para o caso multi-células, é:

$$\frac{E_b}{I_0} = \frac{W}{R} \cdot \frac{\alpha \cdot h \cdot P}{(N_{multi} - 1) \cdot \alpha \cdot h \cdot P + P_{E,total} + \eta_0 \cdot W} = \frac{W}{R} \cdot \frac{1}{(N_{multi} - 1) + \frac{P_{E,total} + \eta_0 \cdot W}{\alpha \cdot h \cdot P}}$$

Decorre que, para o QoS desejado, as populações nos dois casos são tais que:

$$N_{uni} = N_{multi} + \frac{P_{E,total}}{\alpha \cdot h \cdot P} \quad (5.12)$$

Conforme definida em Kim, a eficiência de re-uso de frequências do sistema é:

$$K' = \frac{\text{máx. canais de tráfego da célula isolada}}{\text{máx. canais de tráf. da célula p/ caso multi - celular}} = \frac{N_{uni}}{N_{multi}} = 1 + \frac{P_{E,total}}{N_{multi} \cdot \alpha \cdot h \cdot P} \quad (5.13)$$

Calculando-se numericamente a interferência total, conforme descrito, obtivemos $K' \approx 1,32$, levando em conta até 100 anéis de células interferentes ao redor da célula 0. Pode-se verificar no gráfico a seguir que, considerando-se apenas os quatro primeiros anéis, a aproximação já é aceitável, devido à pequena variação do resultado.

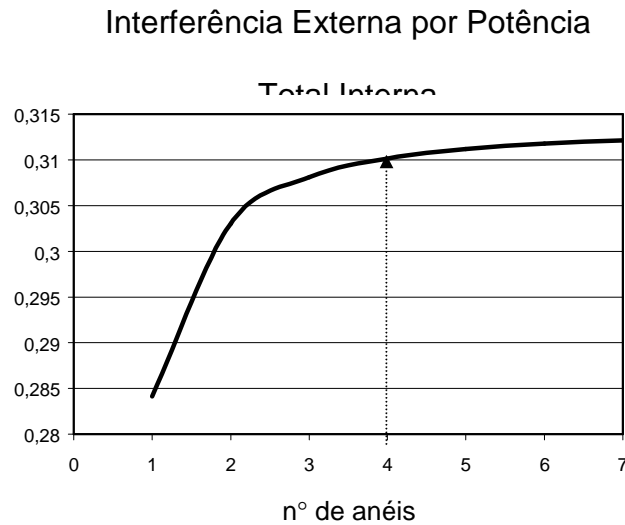


Gráfico 5.1: Fator f de interferência externa

O fator K' nos permite comparar perda de capacidade devido a re-uso de frequências dos sistemas CDMA, AMPS e TDMA (por exemplo, um valor típico em AMPS é fator de re-uso de frequências igual a 7, para $C/I = 18$ dB).

Calculando o inverso de K' , a capacidade, no caso multi-celular é:

$$\frac{N_{multi}}{N_{uni}} = 1 - \frac{P_{E,total}}{N_{uni} \cdot \alpha \cdot h \cdot P} \approx 0,76$$

da máxima em uma célula isolada.

Observar que esse valor supõe distribuição uniforme dos usuários, suposição que se aplica melhor para grandes populações de usuários a taxas baixas (sistemas de voz) do que para sistemas multimídia, com populações menores e taxas elevadas. Em configurações multi-taxas como estamos considerando, dependendo do vetor \mathbf{h} de cada célula, ou seja da localização dos móveis, os níveis de interferência poderão variar muito. Na prática, para calcular a interferência externa, fazemos uma simplificação do problema geométrico que consiste em considerar todos os usuários de cada anel como se estivessem em uma única célula daquele anel, o que pode ser feito por simetria. O problema geométrico passa a poder ser resolvido como o de um vetor de células. Observar que essa simplificação fortalece a hipótese de distribuições uniformes nas células.

Dessa forma, consideraremos o resultado médio, apresentado acima.

5.2 Modelagem do Caso Multi-celular

Seja um sistema celular homogêneo, ou seja, em que todas as células são idênticas e têm a mesma ocupação, e com duas classes de usuários, conforme já apresentado. A expressão de capacidade do sistema vale:

$$\frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{1} + 1} + \frac{\frac{N_2}{W}}{\frac{R_2 \cdot \gamma_2}{1} + 1} = 1 - \frac{P_{E, total} + \eta_0 \cdot W}{\left(\frac{W}{R_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot P_i^* \cdot h_i}, \quad i = 1, 2$$

e

$$P_i^* = \frac{P_{E, total} + \eta_0 \cdot W}{\left(\frac{W}{R_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot h_i \cdot \left[1 - \frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{1} + 1} - \frac{\frac{N_2}{W}}{\frac{R_2 \cdot \gamma_2}{1} + 1} \right]} \leq p_i$$

Recorrendo à expressão de $P_E(d)$, a primeira expressão pode ser re-escrita como:

$$\frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{1} + 1} + \frac{\frac{N_2}{W}}{\frac{R_2 \cdot \gamma_2}{1} + 1} = 1 - \frac{6 \cdot P_E(2R) + 12 \cdot P_E(4R) + \dots + \eta_0 \cdot W}{\left(\frac{W}{R_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot P_i^* \cdot h_i}, \quad i = 1, 2$$

onde:

$$P_E(d) = P_{E_1}(d) + P_{E_2}(d) \quad (5.14)$$

e

$$P_{E_i}(d) = 2 \cdot N_i \cdot h P_i^* \cdot g(d)$$

referentes às classes 1 e 2. Observar que estamos considerando infinitos anéis, a distâncias $d=2R, 4R, \dots$

O termo $g(d)$ vale:

$$g(d) = 2 \cdot k^2 \cdot \ln \left(\frac{k^2}{k^2 - 1} \right) - \frac{4 \cdot k^4 - 6 \cdot k^2 + 1}{2 \cdot (k^2 - 1)^2}, \text{ para } k = \frac{d}{R}$$

Logo:

$$\frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{1} + 1} + \frac{\frac{N_2}{W}}{\frac{R_2 \cdot \gamma_2}{1} + 1} = 1 - \frac{(12 \cdot g(2R) + 24 \cdot g(4R) + \dots) \cdot (N_1 \cdot h_1 \cdot P_1^* + N_2 \cdot h_2 \cdot P_2^*) + \eta_0 \cdot W}{\left(\frac{W}{R_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot P_i^* \cdot h_i} =$$

$$= 1 - \frac{(12 \cdot g(2R) + 24 \cdot g(4R) + \dots) \cdot \left(N_1 \cdot h_1 \cdot P_1^* + N_2 \cdot h_1 \cdot P_1^* \cdot \frac{\left(\frac{W}{R_1 \cdot \gamma_1} + 1 \right)}{\left(\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_2} + 1 \right)} \right) + \eta_0 \cdot W}{\left(\frac{W}{R_1 \cdot \gamma_1} + 1 \right) \cdot P_1^* \cdot h_1}$$

Resulta:

$$\frac{\frac{N_1}{\frac{W}{R_1 \cdot \gamma_1} + 1} + \frac{N_2}{\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_2} + 1}}{\frac{W}{R_1 \cdot \gamma_1} + 1} = 1 - (12 \cdot g(2R) + 24 \cdot g(4R) + \dots) \cdot \left[\frac{\frac{N_1}{\frac{W}{R_1 \cdot \gamma_1} + 1} + \frac{N_2}{\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_2} + 1}}{\frac{W}{R_1 \cdot \gamma_1} + 1} \right] -$$

$$- \frac{\eta_0 \cdot W}{\left(\frac{W}{R_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot P_i^* \cdot h_i}$$

e, portanto:

$$\frac{\frac{N_1}{\frac{W}{R_1 \cdot \gamma_1} + 1} + \frac{N_2}{\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_2} + 1}}{\frac{W}{R_1 \cdot \gamma_1} + 1} = \frac{1}{1 + 12 \cdot g(2R) + 24 \cdot g(4R) + \dots} \cdot \left(1 - \frac{\eta_0 \cdot W}{\left(\frac{W}{R_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot P_i^* \cdot h_i} \right)$$

(5.15)

Calculando da forma apresentada, obtemos:

$$\frac{1}{1 + 12 \cdot g(2R) + 24 \cdot g(4R) + \dots} = \frac{1}{1 + f} \approx 0,76$$

onde f é a relação entre potências recebidas externa e interna (corresponde ao impacto em capacidade devido a ambiente multi-celular). Observar que há diferentes métodos para se calcular f , dos quais escolhemos, nesse capítulo, o apresentado em [Kim93]. Esse método corresponde ao das “circunferências inscritas”, em que se aproximam as células por circunferências inscritas no

“grid” hexagonal. Outros métodos aproximam as células pelas “circunferências circunscritas” e pelos próprios hexágonos (esse último, de mais difícil resolução). Os valores obtidos pelos outros dois métodos são, respectivamente, $f=0,56$ e $0,69$, refletindo o fato de que, na aproximação pelas “circunferências inscritas”, desconsidera-se o efeito de algumas regiões de interferência entre os círculos e, por outro lado, usando as “circunferências circunscritas”, contabilizam-se algumas regiões duas vezes.

Observar que esse fator só depende da geometria do problema, mantendo-se constante para outras potências e raios de cobertura. O valor só pode ser melhorado, alterando-se a geometria, por exemplo, fazendo áreas de cobertura descontínuas para alguns serviços, como veremos mais adiante.

A expressão final de capacidade, no caso multi-celular, é:

$$\frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{W} + 1} + \frac{\frac{N_2}{W}}{\frac{R_2 \cdot \gamma_2}{W} + 1} = \frac{1}{1+f} - \frac{\eta'_0 \cdot W}{\left(\frac{W}{R_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot P_i^* \cdot h_i} \quad (5.16)$$

onde η'_0 corresponde ao η_0 corrigido.

Esses resultados mostram que, no sistema homogêneo, independente das potências, há uma redução de capacidade de:

$$\frac{f}{1+f}$$

devido à célula não estar isolada.

Além disso, não podemos mais desprezar o termo referente ao ruído AWGN, como fizemos antes, pois as potências agora são limitadas. Portanto, é devido à existência desse termo que concluímos que quanto mais restritivas forem as limitações de potência, menores serão as capacidades.

No caso multi-taxas e de maximização de “throughput”, as limitações de potência impactam na capacidade, sobretudo no esquema “scheduling”, em que os usuários transmitem por “bursts” e com potências instantâneas maiores. Esperamos um impacto considerável nos ganhos de “scheduling”.

Assim, observando que usuários de Classe 2 próximos da borda da célula restringem o ganho de “scheduling” e ainda são as maiores fontes de interferência, conclui-se que uma solução melhor para o “scheduling” seria permiti-lo apenas em um sub-conjunto dos usuários de Classe 2, aqueles localizados em uma área de raio $r' < r$ (raio da célula).

Retomando a expressão 5.6, agora para duas classes de usuários e com a expressão 5.16 de capacidade, temos:

$$\frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} + \frac{N_2}{\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_2} + 1} = \frac{1}{1+f} - \frac{\eta'_0 \cdot W}{\min \left\{ p_i \cdot h_i \cdot \left(\frac{W}{R_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \right\}}$$

Na prática são os usuários de Classe 2, que utilizam taxas bem mais elevadas, que restringem o sistema, ou seja:

$$\frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{W} + 1} + \frac{\frac{N_2}{W}}{\frac{R_2 \cdot \gamma_2}{W} + 1} = \frac{1}{1+f} - \frac{\eta'_0 \cdot W}{p_2 \cdot \left(\frac{W}{R_2 \cdot \gamma_2} + 1 \right) \cdot \min\{h_2^i\}}, \text{ modo convencional}$$

e

$$\frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{W} + 1} + \frac{\frac{k_2}{W}}{\frac{R_2^* \cdot \gamma_2}{W} + 1} + \frac{\frac{N_2 - k_2}{W}}{\frac{R_0 \cdot \gamma_2}{W} + 1} = \frac{1}{1+f} - \frac{\eta'_0 \cdot W}{p_2 \cdot \left(\frac{W}{R_2^* \cdot \gamma_2} + 1 \right) \cdot \min\{h_2^i\}}, \text{ modo scheduling}$$

(5.17)

onde:

$$\eta'_0 = \frac{1}{1+f} \cdot \eta_0$$

As potências valem:

$$P_i^* = \frac{\eta'_0 \cdot W}{\left(\frac{W}{R_i \cdot \gamma_i} + 1 \right) \cdot h_i \cdot \left[\frac{1}{1+f} - \frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{r_1 \cdot \gamma_1}{W} + 1} + \frac{\frac{N_2}{W}}{\frac{R_2 \cdot \gamma_2}{W} + 1} \right]}$$

e podem ser escritas de forma análoga para o modo “scheduling” (as conclusões sobre potências em modo convencional e “scheduling” apresentadas no capítulo 3 podem ser estendidas de forma análoga).

- Taxas Máximas em Modos Convencional e “Scheduling”

$$R_2 = \frac{W}{\gamma_2} \cdot \frac{\frac{1}{1+f} - \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1}}{\left(N_2 + \frac{\eta'_0 \cdot W}{p_2 \cdot h_{2,\min}} - \frac{1}{1+f} + \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} \right)} \quad (5.18)$$

$$R_2^* = \frac{R_2 \cdot R_0 \cdot \left(\frac{1}{1+f} - \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} - \frac{N_2 - k_2}{\frac{W}{R_0 \cdot \gamma_2} + 1} \right)}{R_0 \cdot \left(\frac{1}{1+f} - \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} \right) - R_2 \cdot \left(\frac{N_2 - k_2}{\frac{W}{R_0 \cdot \gamma_2} + 1} \right)} \quad (5.19)$$

De forma análoga ao exposto em [Ram98a] para o caso uni-celular, iremos analisar as condições para que:

$$T = \frac{k_2}{N_2} \cdot R_2^* \geq R_2$$

Isso equivale a:

$$g(k_2) = k_2^2 \cdot \frac{R_0}{\frac{W}{R_0 \cdot \gamma_2} + 1} + k_2 \cdot \left\{ R_0 \cdot \frac{1}{1+f} - \frac{N_2 \cdot (R_0 + R_2)}{\frac{W}{R_0 \cdot \gamma_2} + 1} - \frac{N_1 \cdot R_0}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} \right\} +$$

$$+ \frac{N_2^2 \cdot R_2}{\frac{W}{R_0 \cdot \gamma_2} + 1} - N_2 \cdot R_0 \cdot \left(\frac{1}{1+f} - \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} \right) \geq 0$$

Cujas raízes são:

$$r_1 = N_2$$

e

$$r_2 = \frac{\left(\frac{\frac{N_1 \cdot R_0}{W} + 1}{r_1 \cdot \gamma_1} + \frac{\frac{N_2 \cdot R_2}{W} + 1}{R_0 \cdot \gamma_2} - R_0 \cdot \frac{1}{1+f} \right)}{\frac{\frac{R_0}{W} + 1}{R_0 \cdot \gamma_2}} \quad (5.20)$$

Suponha primeiramente $r_1 < r_2$. Nesse caso, as soluções são $k_2 \leq N_2$, portanto ilimitadas em k_2 . Para $r_1 < r_2$, vale:

$$R_0 \leq \frac{W}{\gamma_2} \cdot \frac{\left\{ \frac{N_2}{R_2 \cdot \gamma_2} - \left(\frac{1}{1+f} - \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} \right) \right\}}{N_2 + \frac{1}{1+f} - \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1}} = R_{0,1} = \frac{W}{\gamma_2} \cdot \frac{A}{B} \quad (5.21)$$

O denominador é sempre positivo e, para positividade de $R_{0,1}$, fazemos $A \geq 0$

(usando a expressão 5.17) e resulta:

$$\frac{\eta'_0 \cdot W}{p_2 \cdot h_{2,\min}} \leq \frac{1}{1+f} - \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} = U_1 \quad (5.22)$$

Agora, supondo $r_1 > r_2$, as soluções procuradas estão na região $k_2 \leq r_2 = k_{2\max}$.

Para $r_1 > r_2$, sabemos que vale:

$$R_0 \geq R_{0,1}$$

Fazendo $A \geq 0$, resulta:

$$\frac{\eta'_0 \cdot W}{p_2 \cdot h_{2,\min}} \leq U_1$$

Outra condição necessária para haver soluções com $k_2 \leq r_2$ é que $r_2 \geq 1$.

Essa condição, por sua vez, resulta:

$$\frac{\eta'_0 \cdot W}{p_2 \cdot h_{2,\min}} \leq \frac{1}{1+f} - \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} - \frac{N_2 \cdot \left[\frac{2}{1+f} - \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} \right]}{\left\{ \left(\frac{W}{R_0 \cdot \gamma_2} + 1 \right) \cdot \left[\frac{1}{1+f} - \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} \right] + 1 \right\}} = U_2 < U_1 \quad (5.23)$$

e para que $U_2 \geq 0$, temos:

$$R_0 \leq \frac{\frac{W}{\gamma_2} \cdot \left[\frac{1}{1+f} - \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} \right]^2}{\left\{ N_2 + (N_2 - 1) \cdot \left(\frac{1}{1+f} - \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} \right) - \left[\frac{1}{1+f} - \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} \right]^2 \right\}} = R_{0,2} > R_{0,1} \quad (5.24)$$

Logo, $T \geq R_2$ vale para:

$$\frac{\eta'_0 \cdot W}{p_2 \cdot h_{2,\min}} \leq U_1$$

$$R_0 \leq R_{0,1}$$

$$k_2 \text{ ilimitado}$$

ou

$$\frac{\eta'_0 \cdot W}{p_2 \cdot h_{2,\min}} \leq U_2$$

$$R_{0,1} \leq R_0 < R_{0,2}$$

$$k_2 \leq k_2^{\max}$$

5.3 Resultados Numéricos

Parâmetro	Símbolo	Valor
largura de banda	W	1,23 MHz
taxa mínima voz	R_v	9,6 kbps
taxas mínimas dados	R_d	14,4 kbps
QoS voz	γ_v	5
QoS dados	γ_d	7,0795
densidade AWGN	η_0	10^{-7} W/Hz
potência máxima voz	p_v	0,5 W
potência máxima dados	p_d	0,7; 1; 1,5; 2 W
ganho mínimo de canal voz	h_v	0,3
ganho mínimo de canal dados	h_d	0,3
usuários de dados simultâneos	k_2	1

Tabela 5.1: Especificações para o caso multi-celular e com potência limitada

Throughputs em Modos Convencional e Scheduling para $N_1=15$ e Potências Limitadas

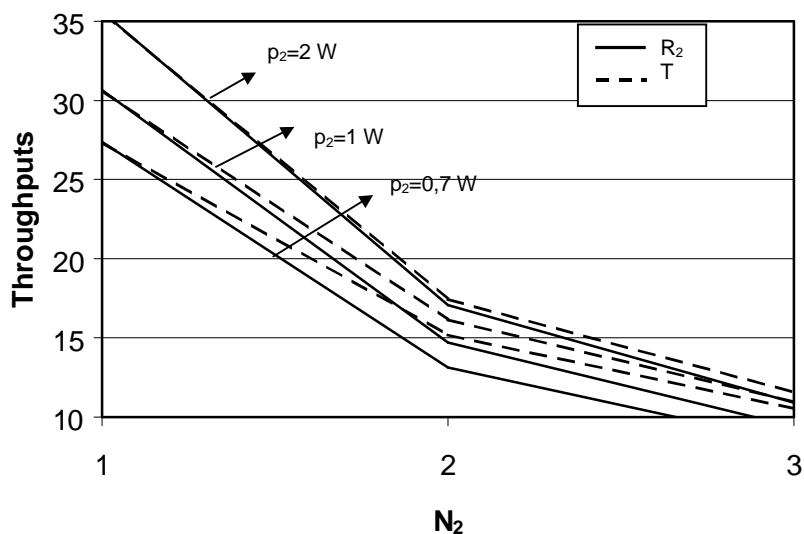


Gráfico 5.2: “Throughputs” (em kbps) obtidos para $N_1=15$ e multi-células

Ganho em Throughput G vs. N_2 para $N_1=15$ e Potências Limitadas

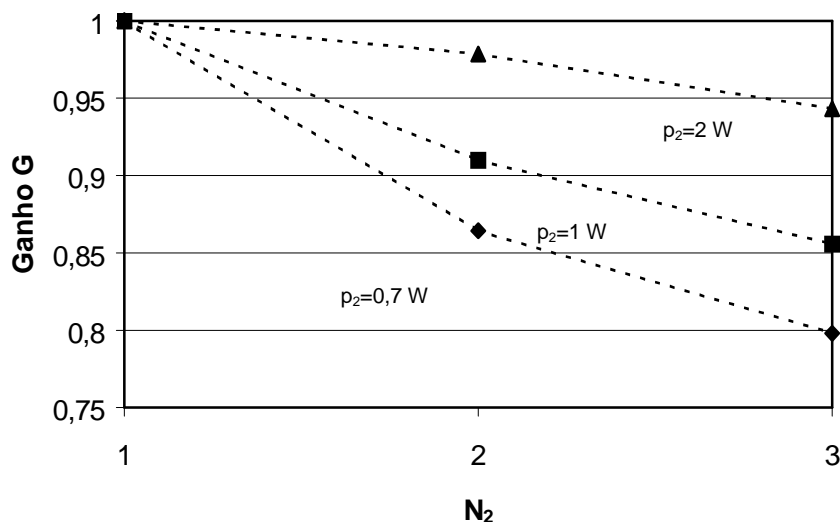


Gráfico 5.3: Ganhos obtidos para $N_1=15$ e multi-células

**Throughputs em Modos Convencional e Scheduling
para $N_1=8$ e Potências Limitadas**

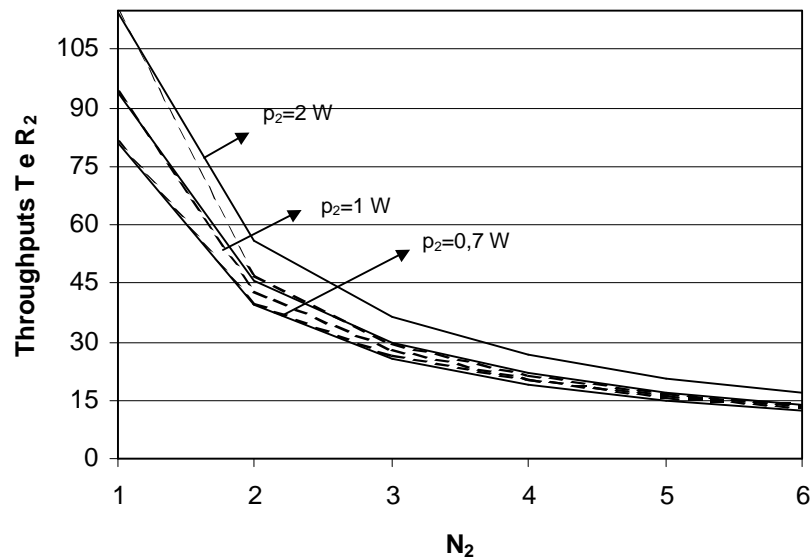


Gráfico 5.4: “Throughputs” (em kbps) obtidos para $N_1=8$ e multi-células

**Ganho em Throughput G vs. N_2
para $N_1=8$ e Potências Limitadas**

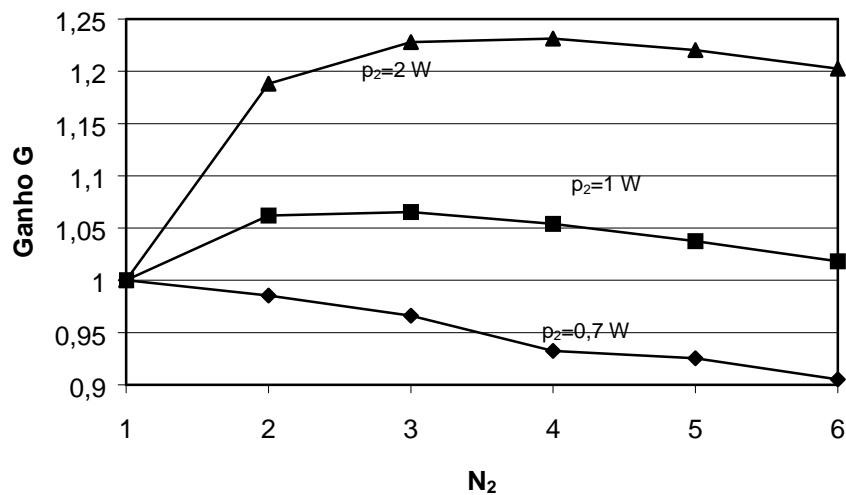


Gráfico 5.5: Ganhos obtidos para $N_1=8$ e multi-células

**Throughputs em Modos Convencional e Scheduling
para $N_1=3$ e Potências Limitadas**

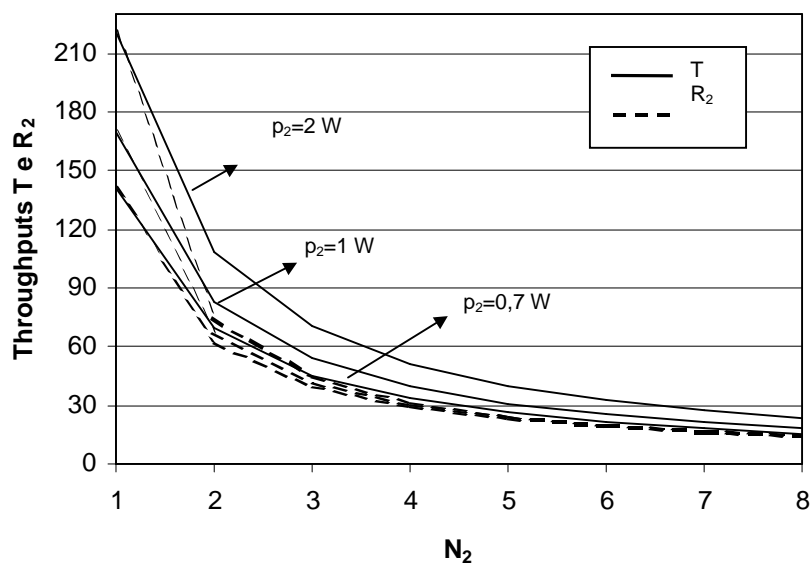


Gráfico 5.6: “Throughputs” (em kbps) obtidos para $N_1=3$ e multi-células

**Ganho em Throughput G vs. N_2
para $N_1=3$ e Potências Limitadas**

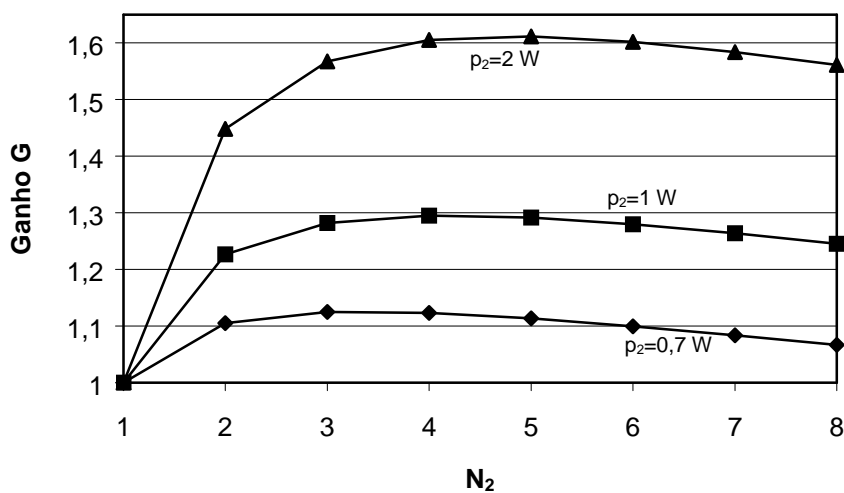


Gráfico 5.7: Ganhos obtidos para $N_1=3$ e multi-células

**Ganho em Throughput G vs. N_2
para $N_1=13$ e Potências Limitadas**

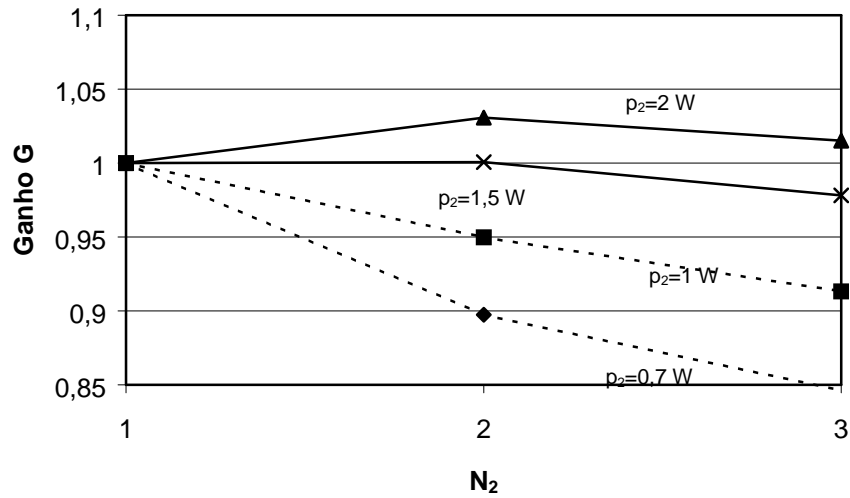


Gráfico 5.8: Ganhos obtidos para $N_1=13$ e multi-células

**Limitações de Ruído AWGN Relativo vs. N_2
para $N_1=13$ e Potências Limitadas**

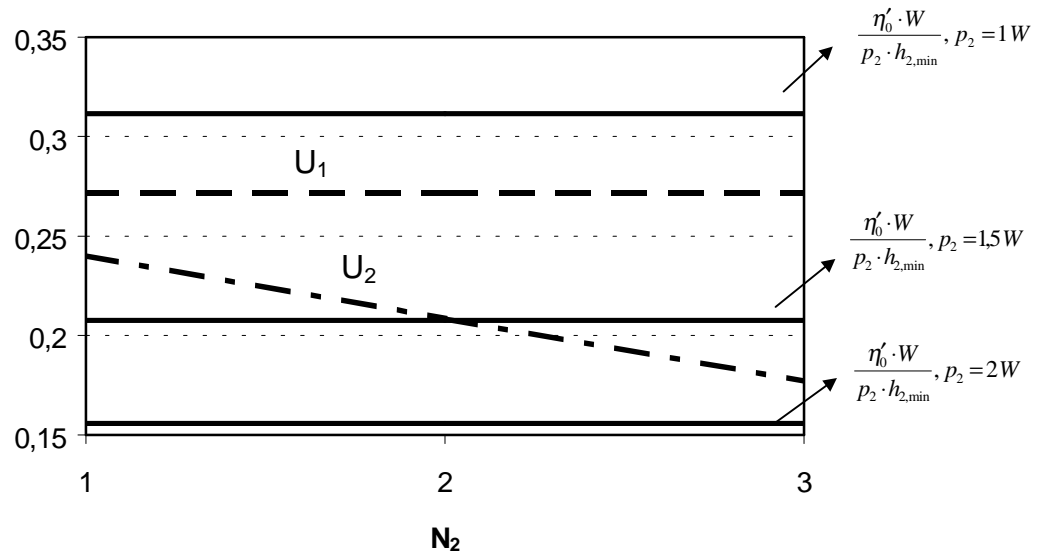


Gráfico 5.9: Limitações para ganho de “scheduling” – ruído relativo

**Limitações de R_0 vs. N_2
para $N_1=13$ e Potências Limitadas**

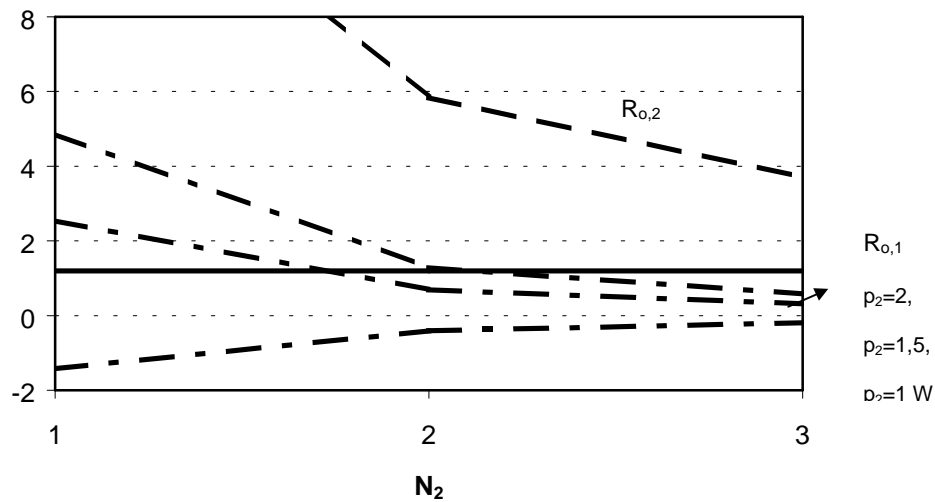


Gráfico 5.10: Limitações para ganho de “scheduling” – taxa de sincronismo (em kbps)

Observando simultaneamente os gráficos de ganho e limitações de ruído e taxa R_0 para $N_1=13$, verifica-se que:

- $p_2=2$ W
 - com $N_2=1$ ou 2, $R_0 < R_{0,1}$ e “ruído relativo” $< U_1$
 - com $N_2=3$, $R_{0,1} < R_0 < R_{0,2}$ e “ruído relativo” $< U_2$

Logo, há ganho nas três situações

- $p_2=1,5$ W
 - com $N_2=1$, $R_0 < R_{0,1}$ e “ruído relativo” $< U_1$

- com $N_2=2$, $R_{0,1} < R_0 < R_{0,2}$ e “ruído relativo” $< U_2$

- com $N_2=3$, $R_{0,1} < R_0 < R_{0,2}$ e “ruído relativo” $> U_2$

Logo, há ganho apenas nos dois primeiros casos

- $p_2=1$ W

- com $N_2=1, 2$ e 3 , $R_{0,1} < R_0 < R_{0,2}$ e “ruído relativo” $> U_2$

Logo, não há ganho

Como se vê, o usuário mais limitado restringe o desempenho de toda a célula (principalmente no modo “scheduling”) e representa a principal fonte de interferência inter-células, pois está próximo dos limites de cobertura. Simplesmente reduzir a sua potência máxima não é razoável pois, ao mesmo tempo que diminui a interferência causada, limita muito o desempenho e o ganho.

5.4 Limitação das Distâncias

Uma adaptação no esquema que parece amenizar os dois problemas, resultando uma geometria de menor interferência entre as células e um novo usuário mais limitado (em condição melhor que o primeiro), é a redução da área em que os usuários de Classe 2 podem transmitir a taxas altas. Ou seja, apenas usuários de Classe 2 localizados dentro de uma circunferência de raio r' , contida na área de cobertura da célula ($r' < r$, raio da célula), é que poderão ter taxas maximizadas. Os demais transmitem a taxa mínima, r_2 . Passam a

existir três classes de usuários, duas delas a taxas constantes e uma que permite maximização de taxas.

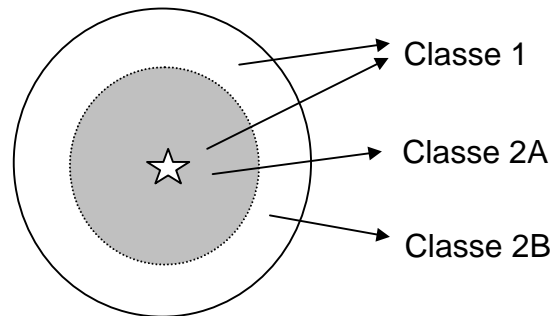


Figura 5.3: Distribuição de classes no caso de distâncias limitadas

Consideramos os mesmos parâmetros usados anteriormente, com a condição de que usuários de dados à distância maior que $0,8.R$ da rádio base estão limitados a transmitir à taxa mínima.

Para perda de percurso na borda igual a $0,3$, a perda de percurso na distância máxima assim definida vale:

$$\frac{h_{\min, \lim}}{0,3} = \left(\frac{0,8R}{R} \right)^{-4} \quad (5.25)$$

resulta $h_{\min, \lim} \approx 0,7$.

Podemos re-definir as classes, em função das características de cada grupo de usuários:

- Classe 1: (não muda) usuários de voz a taxa constante
- Classe 2-A: usuários de dados a distâncias menores ou iguais a $h_{\min, \lim}$, podem maximizar taxa e fazer “scheduling”.

- Classe 2-B: usuários de dados a distâncias maiores que $h_{\min, \lim}$, utilizam taxa mínima e não podem fazer “scheduling”.

Dada uma distribuição homogênea de usuários na célula, para N_2 usuários de dados no total, temos que $N_{2,A}=0,64.N_2$ e $N_{2,B}=0,36.N_2$ (relação das áreas).

Utilizando o método de cálculo de interferência externa já descrito, temos:

$$P_{E, total} = \sum_{i=1}^6 (P_{E_1}(2R) + P_{E_2}(2R))_i + \sum_{i=1}^{12} (P_{E_1}(4R) + P_{E_2}(4R))_i + \dots$$

sendo que, agora, vale:

$$P_{E_1} = 2 \cdot N_1 \cdot hP_1 \cdot g(d)$$

e

$$P_{E_2} = P_{E_{2A}} + P_{E_{2B}}$$

A interferência $P_{E,2A}$ corresponde ao círculo menor, de raio $0,8.R$ e a $P_{E,2B}$, ao anel formado pelos círculos de raios $0,8.R$ e R . A interferência $P_{E,2A}$ resulta análoga à de uma célula de raio R , aumentando-se a distância entre as rádio bases proporcionalmente. A $P_{E,2B}$ é determinada descontando-se da interferência de uma célula de raio R , a parcela referente à célula menor de raio $0,8.R$. Ou seja:

$$P_{E_{2A}} = 2 \cdot N_{2A} \cdot hP_{2A} \cdot g\left(\frac{d}{0,8}\right)$$

e

(5.26)

$$P_{E_{2B}} = 2 \cdot N_{2B} \cdot hP_{2B} \cdot \left[g(d) - g\left(\frac{d}{0,8}\right) \right]$$

Definindo:

$$f_1 = 12 \cdot g(2R) + 24 \cdot g(4R) + \dots \approx 0,32 \quad (5.27)$$

$$f_2 = 12 \cdot g\left(\frac{2R}{0,8}\right) + 24 \cdot g\left(\frac{4R}{0,8}\right) + \dots = 12 \cdot g(2,5R) + 24 \cdot g(5R) + \dots \approx 0,1$$

Resultam as seguintes expressões de capacidade do sistema em modos convencional e “scheduling”:

$$(1+f_1) \cdot \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} + (1+f_2) \cdot \frac{N_{2A}}{\frac{W}{R_{2A} \cdot \gamma_2} + 1} + (1-f_1+f_2) \cdot \frac{N_{2B}}{\frac{W}{R_{2B} \cdot \gamma_2} + 1} =$$

$$1 - \frac{\eta_0 \cdot W}{p_2 \cdot \left(\frac{W}{R_{2A} \cdot \gamma_2} + 1 \right) \cdot \min\{h_{2A}^i\}} \quad (5.28)$$

e

$$(1+f_1) \cdot \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} + (1+f_2) \cdot \frac{k_{2A}}{\frac{W}{R_{2A}^* \cdot \gamma_2} + 1} + (1+f_2) \cdot \frac{N_{2A} - k_{2A}}{\frac{W}{R_0 \cdot \gamma_2} + 1} + (1-f_1+f_2) \cdot \frac{N_{2B}}{\frac{W}{R_{2B} \cdot \gamma_2} + 1} =$$

$$1 - \frac{\eta_0 \cdot W}{p_2 \cdot \left(\frac{W}{R_{2A}^* \cdot \gamma_2} + 1 \right) \cdot \min\{h_{2A}^i\}}$$

Supomos que, mesmo com limitação de distâncias, o usuário mais limitado é de Classe 2-A, devido a sua taxa. Temos:

$$R_{2A} = \frac{W}{\gamma_2} \times$$

$$\frac{\left(1 - (1 + f_1) \cdot \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} - (1 - f_1 + f_2) \cdot \frac{N_{2B}}{\frac{W}{R_{2B} \cdot \gamma_2} + 1}\right)}{(1 + f_2) \cdot N_{2A} + \frac{\eta_0 \cdot W}{p_2 \cdot \min\{h_{2A}^i\}} - 1 + (1 + f_1) \cdot \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} + (1 - f_1 + f_2) \cdot \frac{N_{2B}}{\frac{W}{R_{2B} \cdot \gamma_2} + 1}} \quad (5.29)$$

$$R_{2A}^* = \frac{W}{\gamma_2} \times$$

$$\frac{\left(1 - (1 + f_1) \cdot \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} - (1 + f_2) \cdot \frac{N_{2A} - k_{2A}}{\frac{W}{R_0 \cdot \gamma_2} + 1} - (1 - f_1 + f_2) \cdot \frac{N_{2B}}{\frac{W}{R_{2B} \cdot \gamma_2} + 1}\right)}{(1 + f_2) \cdot k_{2A} + \frac{\eta_0 \cdot W}{p_2 \cdot \min\{h_{2A}^i\}} - 1 + (1 + f_1) \cdot \frac{N_1}{\frac{W}{r_1 \cdot \gamma_1} + 1} + (1 + f_2) \cdot \frac{N_{2A} - k_{2A}}{\frac{W}{R_0 \cdot \gamma_2} + 1} + (1 - f_1 + f_2) \cdot \frac{N_{2B}}{\frac{W}{R_{2B} \cdot \gamma_2} + 1}} \quad (5.30)$$

No gráfico a seguir, apresentamos os ganhos de “scheduling” para dois valores de $R_{2,\min}$, o mínimo especificado e outro, 20 kbps, maior. Observar que em ambos os casos, a limitação de distância melhora o desempenho.

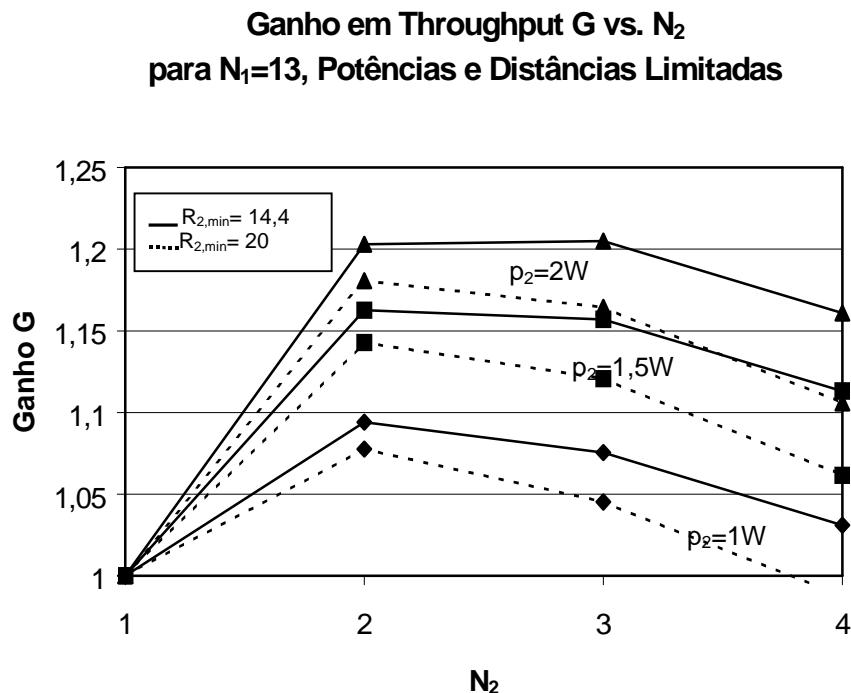


Gráfico 5.11: Ganhos para $N_1=13$ com potências e distâncias limitadas

Observar que os mesmos ganhos obtidos anteriormente para $N_1=8$, agora podem ser obtidos com $N_1=13$, o que representa um aumento considerável de capacidade devido a limitação das distâncias para transmissão em taxas elevadas. Observar que, ao melhorarmos o desempenho dos usuários de dados localizados fora da região de maximização de taxas (elevando a taxa mínima de dados para 20 kbps), os ganhos de “scheduling” diminuem, pois aumenta a MAI. Ainda assim, essa solução é melhor que a de duas classes, com todos os usuários de dados transmitindo à taxas elevadas, independente da localização.

6.

DETECÇÃO MULTI-USUÁRIOS EM SISTEMAS CDMA MULTI-TAXAS

Recentemente, detecção multi-usuários, MUD, tem sido uma alternativa vantajosa em relação aos esquemas convencionais de detecção em CDMA. Detectores multi-usuários ótimos, como primeiramente analisados por Verdú, [Verd86], têm um desempenho teórico muito superior aos detectores convencionais, mas são demasiadamente complexos para serem implementados e, conseqüentemente, costumam ser substituídos por esquemas sub-ótimos. Dentre os detectores multi-usuários sub-ótimos, os tipos mais simples são aqueles que utilizam o cancelamento de interferência, IC.

O esquema IC pode ser implementado através de cancelamento sucessivo ou paralelo de interferência, denominados SIC (“successive”) e PIC (“parallel”),

respectivamente. Ainda são possíveis implementações híbridas. Nesse capítulo, analisaremos um sistema DS/CDMA multi-taxas com detecção do tipo SIC, determinando o ganho de capacidade que esse esquema pode proporcionar, a partir do apresentado em [Warr98], e estendendo esses resultados para o caso multi-classes (“dual-class”, conforme definido nos capítulos anteriores).

O esquema SIC baseia-se no seguinte algoritmo:

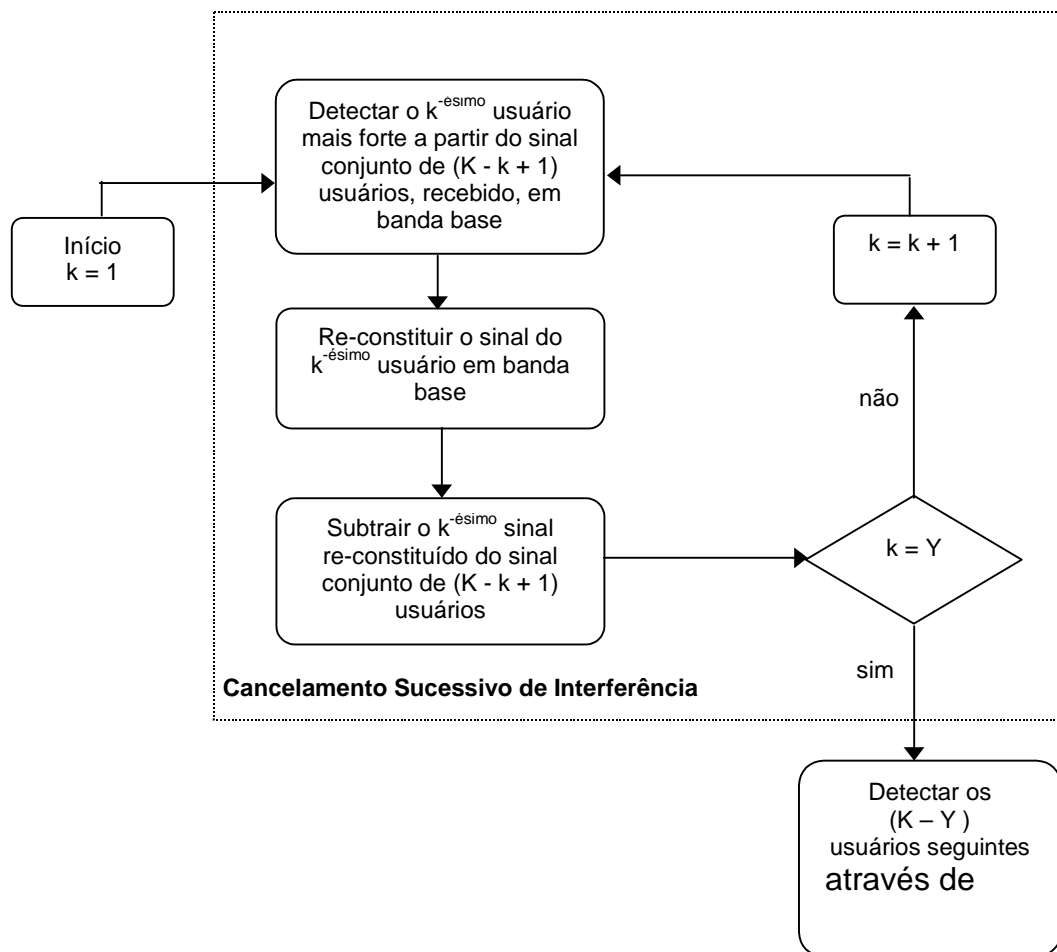


Figura 6.1: Algoritmo de detecção SIC

Esse algoritmo aplica-se a uma célula com K usuários, em que os Y sinais recebidos mais fortes serão detectados, através de SIC, e subtraídos do sinal recebido conjunto. Os $(K-Y)$ sinais seguintes serão detectados através do esquema convencional, que utiliza correladores ou receptores RAKE.

O esquema SIC pode ser implementado da seguinte maneira:

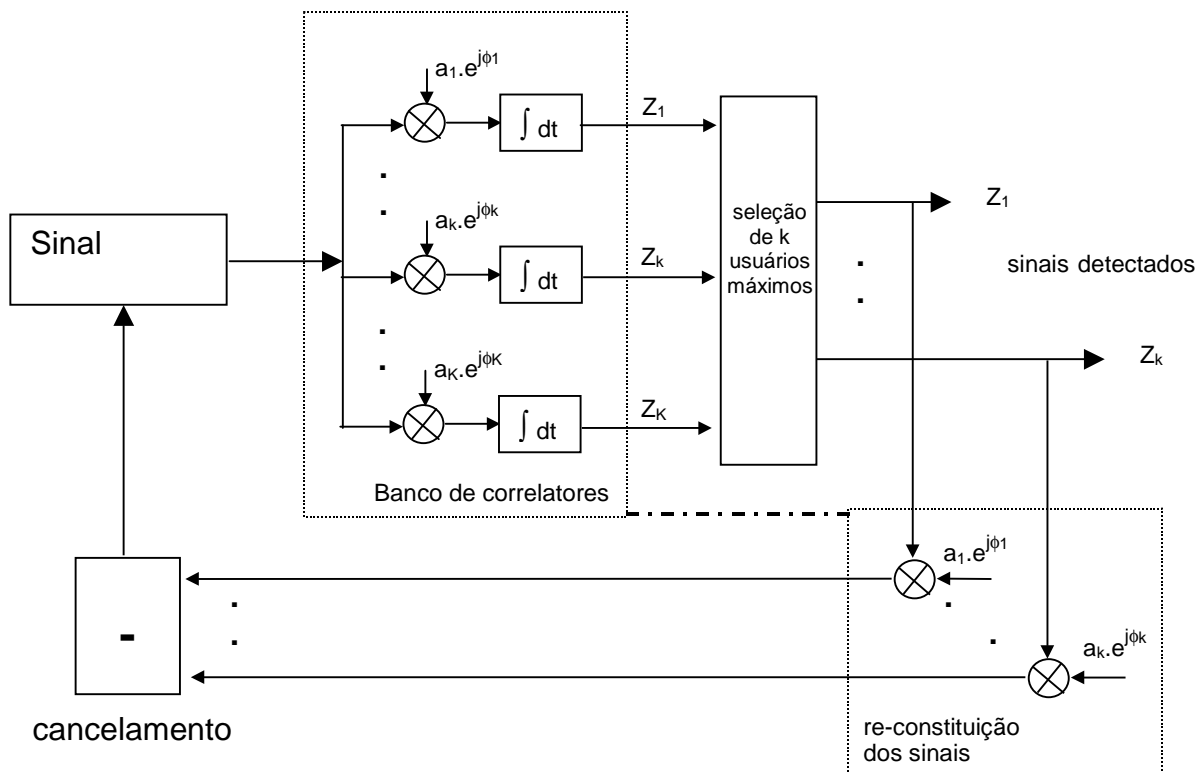


Figura 6.2: Diagrama em blocos do detector SIC

No sistema celular convencional, as potências recebidas de móveis próximos à rádio base formam a principal fonte de interferência para detecção de móveis mais distantes (“near-far effect”).

O controle perfeito de potência convencional trata de eliminar esse efeito, fazendo com que todos os móveis sejam recebidos a mesma potência, como vimos, o que resulta BERs iguais entre os móveis e maximiza a capacidade da célula.

Esquemas de cancelamento de potência, em particular o esquema por cancelamento sucessivo, que será tratado nesse capítulo, implica em que as potências recebidas dos móveis sejam diferentes, mas, uma vez detectadas de forma ordenada, garantam os mesmos BERs para todos os usuários, maximizando a capacidade da célula, como antes, mas de forma a resultar, ainda, expressivos ganhos de capacidade, como veremos adiante.

Observar que, nesse esquema, as potências serão ordenadas basicamente em função das perdas de percurso dos móveis (o que pode ser aproximado pelas distâncias dos móveis à rádio base), o que é intuitivamente aceitável e resultará em redução da interferência inter-células (e economia de bateria), uma vez que os móveis mais próximos das bordas transmitirão com potências mais reduzidas.

No controle de potência convencional, a maximização de capacidade implica potências recebidas iguais para móveis com as mesmas especificações de taxa e QoS, ou seja:

$$h_i \cdot P_i = \gamma \cdot \frac{R}{W} \cdot \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j \cdot P_j + P_{0, \text{total}} \right)$$

onde : (6.1)

$$GP = \frac{W}{R} = \text{cte.}$$

e

$$P_{0, \text{total}} = P_{E, \text{total}} + \eta_0 \cdot W$$

conforme o capítulo anterior. Como R é igual para todos os usuários, podemos fazer:

$$\gamma' = \gamma \cdot \frac{R}{W}$$

e : (6.2)

$$h_i \cdot P_i = \gamma' \cdot \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N h_j \cdot P_j + P_{0, \text{total}} \right)$$

γ e γ' representam, respectivamente, valores de QoS anterior e após detecção.

No caso de SIC, o controle de potência também deve ser utilizado, mas a solução ótima não será com potências recebidas iguais, mas BERs iguais, [Pede96], e:

$$h_i \cdot P_i = \gamma' \cdot \left(\sum_{j=i+1}^N h_j \cdot P_j + P_{0, \text{total}} \right) \quad (6.3)$$

Observar que, agora, as potências são ordenadas segundo disparidades controladas e a MAI do usuário i é composta pelos termos de i+1 a N. Como veremos adiante, as potências necessárias nessa situação são inferiores, reduzindo a interferência inter-células e o consumo dos móveis.

Observar que na expressão 6.3, iniciamos detectando o sinal mais forte, considerando todos os demais como interferência, como no caso convencional. Ele é o primeiro a ser detectado por dois motivos: primeiro porque é a principal fonte de interferência para os demais, e resulta redução máxima de MAI ao ser cancelado na detecção dos seguintes, e, ainda, porque, ao mesmo tempo, é o sinal mais confiável para a primeira detecção, uma vez que sua MAI é mínima.

Como representado nas figuras 6.1 e 6.2, a abordagem mais simples de SIC consiste em cancelar a MAI através da própria detecção dos sinais recebidos, através de um banco de correladores convencional, que seleciona o sinal a ser cancelado dos demais, [Pate94]. Após detectar os sinais e selecionar aquele a ser descontado dos demais, esse sinal deve ser re-constituído e subtraído do sinal conjunto recebido.

Alternativamente, poderíamos estimar separadamente as perdas de percurso e potências de transmissão, o que seria mais trabalhoso, [Duel95].

A saída dos correladores ainda permite obter as fases dos sinais, necessárias para o cancelamento.

Voltando às relações de potência, no caso de controle de potência convencional, e utilizando o resultado:

$$h_i \cdot P_i = hP = \text{cte.}$$

temos:

$$hP \cdot [1 - \gamma' \cdot (N-1)] = \gamma' \cdot P_{0, \text{total}} \quad (6.4)$$

o que resulta:

$$N \leq 1 + \frac{1}{\gamma'} = \frac{W}{R \cdot \gamma} + 1$$

como havíamos visto no capítulo 2.

Essa é a capacidade máxima da célula no esquema convencional, dada em termos de número máximo de usuários para uma determinada especificação de banda, taxa e QoS.

Alternativamente, da expressão 6.3, resulta:

$$h_i \cdot P_i = \gamma' \cdot (\gamma' + 1)^{N-i} \cdot P_{0, \text{total}} \quad (6.5)$$

ou seja, enquanto o usuário mais próximo da rádio base tem potência:

$$h_1 \cdot P_1 = \gamma' \cdot (\gamma' + 1)^{N-1} \cdot P_{0, \text{total}}$$

a do mais fraco (mais distante) vale:

$$h_N \cdot P_N = \gamma' \cdot P_{0, \text{total}}$$

ou seja, é escrita apenas em termos da interferência externa e do ruído térmico.

Calculando a relação entre potências sucessivas, resulta:

$$\frac{h_i \cdot P_i}{h_{i+1} \cdot P_{i+1}} = \gamma' + 1 \quad (6.6)$$

ou seja, γ' mede a disparidade das potências.

Observar que, enquanto no controle de potências convencional havia uma limitação de capacidade devido ao próprio esquema (equação 6.4), e que foi usada nos capítulos anteriores para calcularmos populações e taxas máximas possíveis, no esquema de cancelamento sucessivo de interferências não se obtém tal limitação. A restrição de capacidade máxima que utilizaremos, nesse caso, será:

$$\frac{P_{MAI} + P_{0,total}}{\eta_0 \cdot W} \leq \frac{1}{\eta} \quad (6.7)$$

conforme definido em [Vite93] e utilizado em [Warr98], com P_{MAI} correspondendo à potência total interferente interna à célula (para cada usuário). Observar que essa limitação se deve à restrição da faixa dinâmica máxima que o sinal conjunto recebido pode atingir, conforme [Vite95]. Caso o sinal recebido tenha amplitude maior que a máxima amplitude de entrada, o sinal será distorcido, gerando uma indisponibilidade no sistema. Valores típicos para ocorrência de indisponibilidade estão entre 0,1 e 0,25.

Para analisarmos a capacidade no caso SIC, determinaremos expressões da interferência gerada pelos usuários no caso de haver potências com disparidade ordenada.

6.1 Modelagem dos Esquemas SIC e Convencional com Classe Única

Afim de modelar a interferência gerada pelos usuários, utilizaremos conceitos e resultados da teoria de probabilidades e processos estocásticos, conforme [Papo84], que serão apresentados a seguir.

Seja um experimento com r saídas possíveis, $A_i = A_1, A_2, \dots, A_r$, tais que as probabilidades de ocorrência são:

$$P(A_i) = p_i$$

e

$$p_1 + p_2 + \dots + p_r = 1$$

Consideremos n experimentos sucessivos independentes, cada um deles definido conforme o experimento acima, e tais que A_i ocorre k_i vezes, para todo i entre 1 e r , ou seja, $\sum_{i=1}^r k_i = n$. A probabilidade desse resultado, não importando a ordem de ocorrência, é dada por:

$$P_n(k_1, k_2, \dots, k_r) = \frac{n!}{k_1! \cdot k_2! \cdot \dots \cdot k_r!} \cdot p_1^{k_1} \cdot p_2^{k_2} \cdot \dots \cdot p_r^{k_r} \quad (6.8)$$

Aplicando esse resultado, dada uma célula de raio R e N usuários, distribuídos uniformemente, temos:

A densidade de usuários vale:

$$\frac{N}{\pi \cdot R^2} \quad (\text{usuários}/\text{m}^2)$$

Consideremos uma situação em que o $i^{\text{ésimo}}$ usuário mais próximo da estação rádio base está à uma distância r , ou, mais especificamente, no intervalo $(r, r+dr)$ de distância da mesma, onde dr é um diferencial de comprimento.

O fato de se tratar do $i^{\text{ésimo}}$ usuário, implica que temos, ainda, outros $(i-1)$ usuários a distâncias menores do que r e $(N-i)$, a distâncias entre $r+dr$ e R . Portanto, tratam-se dos seguintes eventos:

- evento A_1 , correspondente à existência de um usuário no intervalo de distâncias $(r, r+dr)$, ocorrendo uma vez ($k_1=1$);
- evento A_2 , correspondente à existência de um usuário no intervalo $(r+dr, R)$, ocorrendo $(N-i)$ vezes ($k_2=N-i$);
- evento A_3 , correspondente à existência de um usuário no intervalo $(0, r)$, ocorrendo $(i-1)$ vezes ($k_3=i-1$).

Por outro lado, sabemos que, para uma distribuição homogênea de usuários, os números médios de usuários em cada região valem:

- na coroa de raio r e espessura dr :

$$(2 \cdot r \cdot dr + d^2r) \cdot \frac{N}{R^2} \approx \frac{2 \cdot r \cdot N}{R^2} \cdot dr$$

- no círculo de raio r :

$$N \cdot \frac{r^2}{R^2}$$

- no anel formado pelas circunferências de raios r e R :

$$N \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$$

E as probabilidades de localização referentes às três regiões definidas valem, respectivamente (p_1, p_2, p_3):

$$\frac{2 \cdot r}{R^2} \cdot dr \quad ; \quad \frac{r^2}{R^2} \quad ; \quad 1 - \frac{r^2}{R^2}$$

Logo, através da expressão 6.8, a probabilidade do evento em que o i -ésimo usuário está na região $(r, r+dr)$, dadas as probabilidades de cada região, vale:

$$P_N(i) = \frac{N!}{(N-i)! \cdot (i-1)! \cdot 1!} \cdot \left(\frac{2 \cdot r}{R^2} \cdot dr\right)^1 \cdot \left(\frac{r^2}{R^2}\right)^{i-1} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^{N-i} \quad (6.9)$$

que é equivalente a:

$$P_N(i) = \binom{N}{i} \cdot i \cdot \left(\frac{r^2}{R^2}\right)^{i-1} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^{N-i} \cdot \frac{2 \cdot r}{R^2} \cdot dr$$

Conforme apresentado em [Papo84], esse resultado também pode ser obtido através de “order statistics”, permitindo determinar a função densidade de probabilidade da localização do usuário i na célula. Iniciamos definindo “order statistics”:

Dada uma sequência de n variáveis aleatórias (VAs) x_j , associadas a um experimento \mathfrak{S} , para uma saída ξ do experimento, os valores $x_j(\xi)$ podem ser ordenados, resultando a seguinte sequência de valores:

$$x_{r_1}(\xi) \leq x_{r_2}(\xi) \leq \dots \leq x_{r_n}(\xi)$$

onde r_i é o índice da ordenação dos valores.

Definimos n VAs y_j , “order statistics” de x_j , como sendo:

$$y_1(\xi) = x_{r_1}(\xi) \leq y_2(\xi) = x_{r_2}(\xi) \leq \dots \leq y_n(\xi) = x_{r_n}(\xi)$$

e correspondendo, portanto, à sequência x_j ordenada para o valor específico de ξ (a ordem varia com o resultado ξ).

Seja o evento $\mathfrak{R} = \{y \leq y_i \leq y + dy\}$, ou seja, como anteriormente, de que a i -ésima VA y esteja localizada em um intervalo de valores $(y, y + dy)$. Esse evento ocorre se, e somente se, houver outras $(i-1)$ VAs x_{rj} menores que y e mais $(N-i)$ VAs maiores que $y + dy$.

No experimento \mathfrak{S} , corresponde aos eventos:

- $A_1 = \{x \leq y\}$
- $A_2 = \{y < x \leq y + dy\}$
- $A_3 = \{x > y + dy\}$

que formam uma partição e têm:

- $P(A_1) = F_x(y)$
- $P(A_2) = f_x(y) dy$
- $P(A_3) = 1 - F_x(y)$

o que resulta das próprias definições das funções distribuição e densidade de probabilidades de uma VA.

No experimento \mathfrak{S}^N , a probabilidade de \mathfrak{R} é:

$$\begin{aligned} P_N(\mathfrak{R}) &= \frac{N!}{(N-i)! \cdot (i-1)! \cdot 1!} \cdot (P(A_1))^{i-1} \cdot (P(A_2))^1 \cdot (P(A_3))^{N-i} = \\ &= \frac{N!}{(N-i)! \cdot (i-1)! \cdot 1!} \cdot (F_x(y))^{i-1} \cdot (1-F_x(y))^{N-i} \cdot f_x(y) \cdot dy \end{aligned}$$

Como:

$$f_{y_i}(y) \cdot dy = P\{y \leq y_i \leq y + dy\} = P\{\mathfrak{R}\}$$

resulta : (6.10)

$$f_{y_i}(y) = \frac{N!}{(N-i)! \cdot (i-1)! \cdot 1!} \cdot (F_x(y))^{i-1} \cdot (1-F_x(y))^{N-i} \cdot f_x(y)$$

Essa é a densidade de probabilidade da i -ésima VA y , “order statistics” de x , e pode ser interpretada, ainda, como a densidade de probabilidade de localização de usuários na célula, no caso de potências ordenadas pela distância.

No problema em questão, resulta (como anteriormente):

$$f_i(r) = \binom{N}{i} \cdot i \cdot \left(\frac{r^2}{R^2}\right)^{i-1} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^{N-i} \cdot \frac{2 \cdot r}{R^2} \quad (6.11)$$

Essas serão as densidades de probabilidade de localização dos móveis $i = 1$ a 10, representadas graficamente como a seguir (para dez usuários na célula).

**Densidades de Probabilidade de Localização para
usuários de 1 a 10 (N=10)**

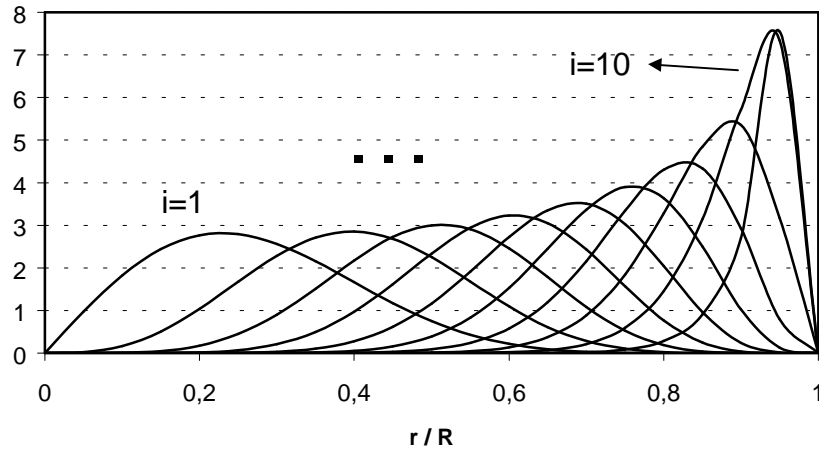


Gráfico 6.1: Densidades de probabilidades dos móveis ordenados segundo potências

O gráfico 6.1 mostra que, para usuários ordenados por potência recebida, a probabilidade do primeiro usuário (potência recebida mais elevada) ser o mais próximo da rádio base (r/R pequeno) é maior que as dos demais usuários, e assim por diante.

Sejam duas células, conforme já definido, com as rádio bases separadas de uma distância d e populações idênticas e uniformemente distribuídas de N usuários em cada. Admitindo perdas de percurso proporcionais à quarta potência das distâncias, a interferência gerada por um usuário i , de uma das células, na célula vizinha, vale:

$$\iint hP \cdot \frac{r^4}{x^4} \cdot f_i(\theta) \cdot f_i(r) \cdot d\theta \cdot dr \quad (6.12)$$

onde x é a distância do móvel à rádio base vizinha, e vale:

$$x^2 = r^2 + d^2 - 2 \cdot r \cdot d \cdot \cos \theta \quad (6.13)$$

conforme Figura 5.1. $f_i(\theta)$ é a densidade de probabilidade correspondente a θ , suposta uniforme com valor $1/2\pi$ para todos os usuários.

Atribuindo ao usuário i a i -ésima potência mais elevada e a i -ésima localização mais próxima da rádio base ("order statistics"), o que, apesar de desprezar possíveis efeitos de sombreamento, é aceitável, e generalizando para todos os usuários da célula, temos que a interferência externa total gerada em uma das células vale:

$$P_E = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2\pi} \cdot \iint h_i P_i \cdot \frac{r^4}{x^4} \cdot f_i(r) \cdot d\theta \cdot dr \quad (6.14)$$

Sabemos, ainda que:

$$h_i \cdot P_i = \gamma' \cdot (\gamma' + 1)^{N-i} \cdot P_{0,total} \quad (6.15)$$

onde :

$$P_{0,total} = P_{E,total} + \eta_0 \cdot W$$

Observar que $P_{E,total}$ é a potência interferente recebida por uma célula de todas as vizinhas, ou seja:

$$P_{E,total} = \sum_{\substack{\text{células} \\ \text{vizinhas}}} P_E \quad (6.16)$$

Substituindo na expressão da interferência P_E , cada um dos resultados anteriores, temos:

$$\begin{aligned}
P_E &= \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{i=1}^N \iint h_i P_i \cdot \frac{r^4}{x^4} \cdot f_i(r) \cdot d\theta \cdot dr = \\
&\frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{i=1}^N \int_0^R \int_0^{2\pi} \gamma' \cdot (\gamma' + 1)^{N-i} \cdot P_{0,\text{total}} \cdot \frac{r^4}{x^4} \cdot \binom{N}{i} \cdot i \cdot \left(\frac{r^2}{R^2} \right)^{i-1} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^{N-i} \cdot \frac{2 \cdot r}{R^2} \cdot d\theta \cdot dr = \\
&\int_0^R \int_0^{2\pi} P_{0,\text{total}} \cdot \frac{\gamma' \cdot r^5}{(r^2 + d^2 - 2 \cdot r \cdot d \cdot \cos \theta)^2} \cdot \frac{1}{\pi R^2} \cdot d\theta \cdot \sum_{i=1}^N (\gamma' + 1)^{N-i} \binom{N}{i} \cdot i \cdot \left(\frac{r^2}{R^2} \right)^{i-1} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^{N-i} dr
\end{aligned} \tag{6.17}$$

Afim de simplificarmos o somatório, apresentaremos o seguinte desenvolvimento matemático:

Suponhamos que:

$$S = \sum_{i=0}^K \binom{K}{i} \cdot i \cdot a^i \cdot b^{K-i}$$

Como o termo correspondente a $i=0$ é nulo, S vale:

$$\sum_{i=1}^K \binom{K}{i} \cdot i \cdot a^i \cdot b^{K-i}$$

e, ainda:

$$\begin{aligned}
&= \sum_{i=1}^K \binom{K}{i-1} \cdot (K-i+1) \cdot a^i \cdot b^{K-i} = \sum_{i=1}^K \binom{K}{i-1} \cdot (K+1) \cdot a^i \cdot b^{K-i} - \sum_{i=1}^K i \cdot \binom{K}{i-1} \cdot a^i \cdot b^{K-i} = \\
&= (K+1) \cdot \frac{a}{b} \cdot \sum_{i=1}^K \binom{K}{i-1} \cdot a^{i-1} \cdot b^{K-i+1} - \sum_{i=1}^K i \cdot \binom{K}{i-1} \cdot a^i \cdot b^{K-i}
\end{aligned}$$

Fazendo a substituição $j = i-1$, no primeiro somatório:

$$S = \frac{a}{b} \cdot (K+1) \cdot \sum_{j=0}^{K-1} \binom{K}{j} \cdot a^j \cdot b^{K-j} - \sum_{i=1}^K i \cdot \binom{K}{i-1} \cdot a^i \cdot b^{K-i}$$

Sabendo-se que:

$$(a+b)^n = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} \cdot a^i \cdot b^{n-i} \quad (6.18)$$

e que o $n^{\text{ésimo}}$ termo desse último somatório vale a^n , resulta (ainda substituindo i por $j=i-1$, no segundo somatório de S):

$$\begin{aligned} S &= \frac{a}{b} \cdot (K+1) \cdot [(a+b)^K - a^K] - \frac{a}{b} \cdot \sum_{j=0}^{K-1} (j+1) \cdot \binom{K}{j} \cdot a^j \cdot b^{K-j} = \\ &= \frac{a}{b} \cdot (K+1) \cdot [(a+b)^K - a^K] - \frac{a}{b} \cdot \left\{ \sum_{j=0}^{K-1} j \cdot \binom{K}{j} \cdot a^j \cdot b^{K-j} + \sum_{j=0}^{K-1} \binom{K}{j} \cdot a^j \cdot b^{K-j} \right\} \end{aligned}$$

Identificando que:

$$\sum_{j=0}^{K-1} j \cdot \binom{K}{j} \cdot a^j \cdot b^{K-j} = S - K \cdot a^K$$

e

$$\sum_{j=0}^{K-1} \binom{K}{j} \cdot a^j \cdot b^{K-j} = (a+b)^K - a^K$$

e desenvolvendo, resulta, por fim:

$$S = a \cdot K \cdot (a+b)^{K-1} \quad (6.19)$$

Retornando à expressão 6.17 e substituindo o resultado anterior, temos:

$$P_E = \int_0^R \int_0^{2\pi} P_{0,\text{total}} \cdot \frac{\gamma' \cdot r^5}{(r^2 + d^2 - 2 \cdot r \cdot d \cdot \cos \theta)^2} \cdot \frac{1}{\pi R^2} \cdot d\theta \cdot \frac{R^2}{r^2} \cdot \frac{r^2}{R^2} \cdot N \cdot \left[\gamma' \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + 1 \right]^{N-1} dr$$

e, portanto :

$$P_E = \int_0^R P_{0,\text{total}} \cdot \frac{\gamma' \cdot r^5 \cdot N}{\pi \cdot R^2} \cdot f(r, d) \cdot \left[\gamma' \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + 1 \right]^{N-1} \cdot dr$$

para :

$$f(r, d) = \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{(r^2 + d^2 - 2 \cdot r \cdot d \cdot \cos \theta)^2}$$

Agora, substituindo P_E em $P_{0,\text{total}}$, temos:

$$P_{0,\text{total}} = \sum_{\substack{\text{células} \\ \text{vizinhas}}} \int_0^R P_{0,\text{total}} \cdot \frac{\gamma' \cdot r^5 \cdot N}{\pi \cdot R^2} \cdot f(r, d) \cdot \left[\gamma' \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + 1 \right]^{N-1} \cdot dr + \eta_0 \cdot W \quad (6.20)$$

Dessa forma, obtemos a potência externa interferente total, $P_{0,\text{total}}$, à qual cada célula está sujeita no caso de potências de transmissão díspares (SIC). Para a expressão de capacidade máxima, 6.7, falta-nos determinar a potência total interferente gerada internamente em cada célula, o que será encaminhado a seguir (esse termo foi desprezado em [Warr98]).

As potências de transmissão em uma célula são díspares porém ordenadas segundo uma razão de proporcionalidade que é constante entre quaisquer duas potências i e $i+1$, para $i = 1, \dots, N$ (expressão 6.6). Dessa forma, o somatório das potências interferentes para um usuário i pode ser resolvido

como a soma de N-i termos de uma progressão geométrica com razão de proporcionalidade q, entre termos genéricos j e j+1, que vale:

$$q = \frac{h_{j+1} \cdot P_{j+1}}{h_j \cdot P_j} = \frac{1}{\gamma' + 1}$$

Observar que, pelo esquema de cancelamento sucessivo de interferência, a interferência interna para o usuário i é constituída pelas potências dos usuários de i+1 até N, ou seja, de N-i termos a começar pelo (i+1)^{-ésimo}.

Seja a_{i+1} , o primeiro termo da “i^{-ésima} p.g.” de razão q. Como sabemos, a soma dos primeiros n-i termos dessa p.g. vale:

$$S_{i,n-i} = a_{i+1} \cdot \frac{q^{n-i} - 1}{q - 1}$$

Utilizando a expressão anterior e supondo um sistema homogêneo (populações idênticas em todas as células), no nosso caso, resulta:

$$P_{MAI,i} = \left\{ (\gamma' + 1)^{N-i} - 1 \right\} \cdot P_{0,total} \quad (6.21)$$

o que leva a:

$$P_{MAI,i} + P_{0,total} = (\gamma' + 1)^{N-i} \cdot P_{0,total} \quad (6.22)$$

Portanto:

$$\frac{P_{MAI,i} + P_{0,total}}{\eta_0 \cdot W} = \frac{(\gamma' + 1)^{N-i} \cdot P_{0,total}}{\eta_0 \cdot W} \leq \frac{1}{\eta}$$

Observar que essa limitação é imposta para todos os usuários, de i= 1 a N. Em particular, estamos interessados em garantir que essa expressão seja válida para o pior caso, ou seja, para o usuário que tem $P_{MAI,i}$ máximo.

Evidentemente, trata-se do primeiro usuário, $i=1$. Considerando também a expressão 6.20, temos:

$$\begin{aligned}
 \frac{P_{MAI,1} + P_{0,total}}{\eta_0 \cdot W} &= \frac{(\gamma' + 1)^{N-1} \cdot P_{0,total}}{\eta_0 \cdot W} = \\
 &= \frac{(\gamma' + 1)^{N-1}}{\eta_0 \cdot W} \cdot \left\{ P_{0,total} \cdot \sum_{\text{células vizinhas}} \int_0^R \frac{\gamma' \cdot r^5 \cdot N}{\pi \cdot R^2} \cdot f(r, d) \cdot \left[\gamma' \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + 1 \right]^{N-1} \cdot dr + \eta_0 \cdot W \right\} = \\
 &= (\gamma' + 1)^{N-1} \cdot \left\{ \frac{P_{0,total}}{\eta_0 \cdot W} \cdot \sum_{\text{células vizinhas}} \int_0^R \frac{\gamma' \cdot r^5 \cdot N}{\pi \cdot R^2} \cdot f(r, d) \cdot \left[\gamma' \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + 1 \right]^{N-1} \cdot dr + 1 \right\}
 \end{aligned} \tag{6.23}$$

Substituindo:

$$\frac{P_{0,total}}{\eta_0 \cdot W} = \frac{1}{(\gamma' + 1)^{N-1}} \cdot \frac{P_{MAI,1} + P_{0,total}}{\eta_0 \cdot W}$$

Limitando a relação de potência total interferente (interferência interna mais externa mais ruído AWGN) por ruído AWGN em até $1/\eta$, resulta:

$$\sum_{\text{células vizinhas}} \int_0^R \frac{\gamma' \cdot r^5 \cdot N}{\pi \cdot R^2} \cdot f(r, d) \cdot \left[\gamma' \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + 1 \right]^{N-1} \cdot dr \leq 1 - (\gamma' + 1)^{N-1} \cdot \eta \tag{6.24}$$

que é a expressão final de capacidade máxima da célula no caso SIC. Essa expressão será calculada numericamente, resultando populações (N) e taxas máximas para determinadas configurações (para calcularmos as taxas, utilizaremos a relação $\gamma' = \gamma R / W$, já apresentada).

Consideraremos, ainda, o caso de detecção convencional e determinaremos uma expressão de capacidade também para esse caso, seguindo a mesma metodologia. Dessa forma, poderemos comparar as capacidades máximas que são atingidas nos dois casos, obtendo os possíveis ganhos com o esquema SIC.

Na detecção convencional, a potência recebida de todos os usuários é idêntica, ou seja, não há ordenação de potências pela localização dos móveis. Dessa forma, temos:

$$\begin{aligned}
 P_{E, \text{conv}} &= \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{i=1}^N \iint hP \cdot \frac{r^4}{x^4} \cdot f_i(r) \cdot d\theta \cdot dr = \\
 &= \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{i=1}^N \int_0^R \int_0^{2\pi} hP \cdot \frac{r^4}{x^4} \cdot \binom{N}{i} \cdot i \cdot \left(\frac{r^2}{R^2} \right)^{i-1} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^{N-i} \cdot \frac{2 \cdot r}{R^2} \cdot d\theta \cdot dr = \\
 &= \int_0^R \int_0^{2\pi} hP \cdot \frac{r^5}{(r^2 + d^2 - 2 \cdot r \cdot d \cdot \cos \theta)^2} \cdot \frac{1}{\pi \cdot R^2} \cdot d\theta \cdot \sum_{i=1}^N \binom{N}{i} \cdot i \cdot \left(\frac{r^2}{R^2} \right)^{i-1} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^{N-i} \cdot dr
 \end{aligned}$$

Resolvendo da mesma forma:

$$P_{E,conv} = \int_0^R \int_0^{2\pi} hP \cdot \frac{r^5}{(r^2 + d^2 - 2 \cdot r \cdot d \cdot \cos \theta)^2} \cdot \frac{1}{\pi \cdot R^2} \cdot d\theta \cdot \frac{R^2}{r^2} \cdot \frac{r^2}{R^2} \cdot N \cdot \left[\frac{r^2}{R^2} - \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \right]^{N-1} \cdot dr$$

e, portanto :

$$P_{E,conv} = hP \cdot \frac{N}{\pi \cdot R^2} \cdot \int_0^R r^5 \cdot f(r, d) \cdot [1]^{N-1} \cdot dr$$

para :

$$f(r, d) = \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{(r^2 + d^2 - 2 \cdot r \cdot d \cdot \cos \theta)^2}$$

7

Essa expressão é idêntica à expressão de interferência externa obtida, no capítulo 5, através da modelagem proposta em [Kim93], com distribuição uniforme de usuários idênticos na célula. Isso significa que a modelagem com potências díspares, ordenadas a partir das localizações dos móveis, como apresentado no capítulo atual, pode ser entendida como uma generalização do caso de potências iguais (onde não há uma ordenação dos usuários), pois permitiu obter os resultados anteriores.

Definindo $P_{0,total,conv}$ como a potência total interferente externa (mais ruído) para o caso de detecção convencional e substituindo $P_{E,conv}$, temos:

$$P_{0,total,conv} = \sum_{\substack{\text{células} \\ \text{vizinhas}}} hP \cdot \frac{N}{\pi \cdot R^2} \cdot \int_0^R r^5 \cdot f(r, d) \cdot dr + \eta_0 \cdot W \quad (6.25)$$

Da mesma forma, para esse caso vale:

$$\frac{P_{MAI,conv} + P_{0,total,conv}}{\eta_0 \cdot W} = \frac{(N-1) \cdot hP + P_{0,total,conv}}{\eta_0 \cdot W} \leq \frac{1}{\eta} \quad (6.26)$$

Impondo a mesma limitação, estaremos fazendo uma comparação exata. Vale, portanto:

$$\begin{aligned}
 & \frac{(N-1) \cdot hP + hP \cdot \frac{N}{\pi \cdot R^2} \cdot \sum_{\text{células vizinhas}} \int_0^R r^5 \cdot f(r, d) \cdot dr + \eta_0 \cdot W}{\eta_0 \cdot W} = \\
 & = \frac{\frac{1}{P_{\text{MAI,conv}} + P_{0,\text{total,conv}}} \cdot \left\{ (N-1) \cdot hP + hP \cdot \frac{N}{\pi \cdot R^2} \cdot \sum_{\text{células vizinhas}} \int_0^R r^5 \cdot f(r, d) \cdot dr + \eta_0 \cdot W \right\}}{\frac{\eta_0 \cdot W}{P_{\text{MAI,conv}} + P_{0,\text{total,conv}}}} = \\
 & = \frac{(N-1) \cdot \gamma' + \gamma' \cdot \frac{N}{\pi \cdot R^2} \cdot \sum_{\text{células vizinhas}} \int_0^R r^5 \cdot f(r, d) \cdot dr + \eta}{\eta} \leq \frac{1}{\eta}
 \end{aligned}$$

Observar que, nesse caso, a potência interferente interna total é a mesma para todos os usuários, igual a $(N-1) hP$ (potências de recepção iguais).

Simplificando, resulta:

$$(N-1) \cdot \gamma' + \gamma' \cdot \frac{N}{\pi \cdot R^2} \cdot \sum_{\text{células vizinhas}} \int_0^R r^5 \cdot f(r, d) \cdot dr \leq 1 - \eta \quad (6.27)$$

que será a expressão final de capacidade no caso de detecção convencional a ser utilizada nesse capítulo.

Observar, ainda, que a relação entre potência externa e potência interna total (N termos) é constante e vale, aproximadamente, 0,32, como vimos no capítulo anterior (abordagem de [Kim93]).

Desenvolvemos, portanto, expressões de capacidade nos casos de detecção SIC e convencional para classe única de usuários. Antes de estender esses resultados para duas classes de usuários, apresentaremos resultados numéricos para o caso de classe única.

6.2 Resultados Numéricos – Caso de Classe Única

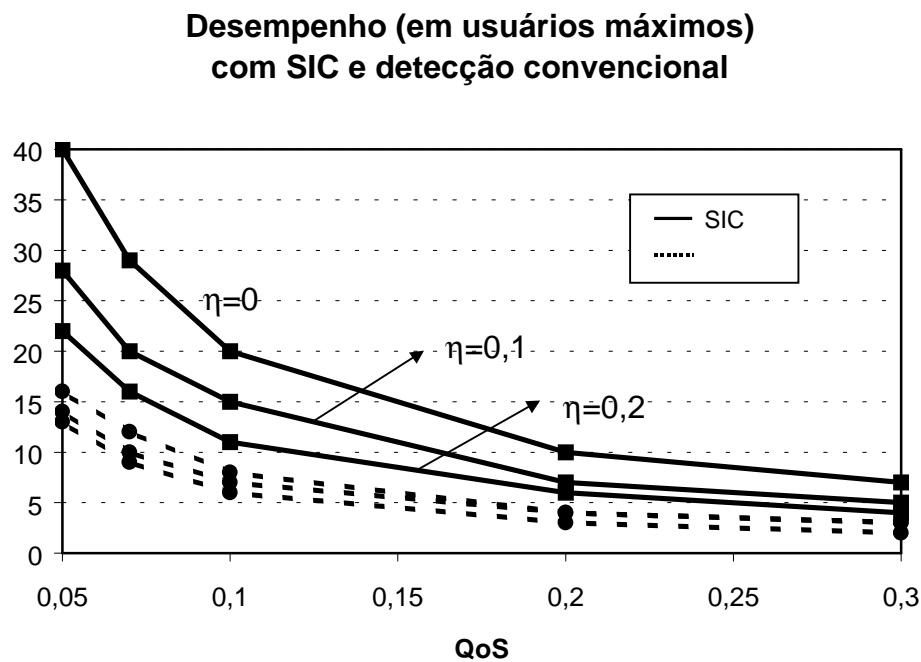


Gráfico 6.2: Números máximos de usuários com SIC e detecção convencional

Suponhamos, agora, que nossa modelagem para classe única seja aplicada a usuários da classe de dados, cujas taxas são variáveis, e podem ser maximizadas. Suponhamos, ainda, que todos os usuários terão taxas e QoS idênticos, mesmo após a maximização, como nos capítulos anteriores.

Como sabemos:

$$\gamma' = \gamma \cdot \frac{R}{W} \quad (6.28)$$

Substituindo: $\gamma=7$; $W = 1230$ kHz e $R=R_{\min}=14,4$ kbps, resulta $\gamma'=0,083$.

Inicialmente, calcularemos, para esse QoS, os números máximos de usuários suportados nos modos SIC e detecção convencional. Observar que se tratam das capacidades máximas a taxas e QoS mínimos, como fizemos em capítulos anteriores. Em seguida, determinaremos os valores máximos de QoS que resultam, no caso SIC, o mesmo número máximo de usuários obtido com taxa mínima, no caso convencional. A partir desse valor máximo de QoS, determinaremos a taxa máxima possível com SIC, para a configuração em questão, ou seja, a solução de maximização de taxas que se obtém com SIC.

Para $\eta=0,1$, e demais parâmetros como definidos, os números máximos de usuários nos dois casos são 17 e 9. Fazendo o número máximo no caso SIC igual a 9, obtemos um γ' máximo nessa situação igual a 0,17. Calculando a taxa máxima correspondente, resulta $R_{\max,9}=29,54$ kbps. Isso significa que, enquanto 9 usuários só podiam utilizar taxas mínimas no caso convencional, com SIC as taxas podem chegar ao valor apresentado. Em termos de ganho devido ao SIC, em analogia ao calculado nos capítulos anteriores, temos $29,54/14,4 = 2,04$.

Agora, com os mesmos parâmetros, vamos variar a população na célula de 1 até o valor máximo, 9, nos dois casos (SIC e detecção convencional) e calcular

os γ' máximos correspondentes à ocupação máxima para cada configuração, nos dois esquemas.

Calculando, obtemos a tabela apresentada a seguir:

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
γ' SIC	2,9	1,05	0,615	0,43	0,33	0,268	0,226	0,195	0,17
R_{\max} SIC	503,84	182,42	106,85	74,70	57,33	46,56	39,26	33,87	29,53
γ' conv.	2,9	0,56	0,305	0,21	0,16	0,13	0,11	0,095	0,0835
R_{\max} conv.	503,84	97,29	52,99	36,48	27,79	22,58	19,11	16,50	14,50
Ganho	1	1,875	2,016	2,047	2,062	2,061	2,054	2,052	2,035

Tabela 6.1: Ganhos em “Throughput” devido ao SIC

que pode ser representada nos seguintes gráficos:

**"Throughputs" em Modos SIC e Convencional
para $N_{\max}=9$**

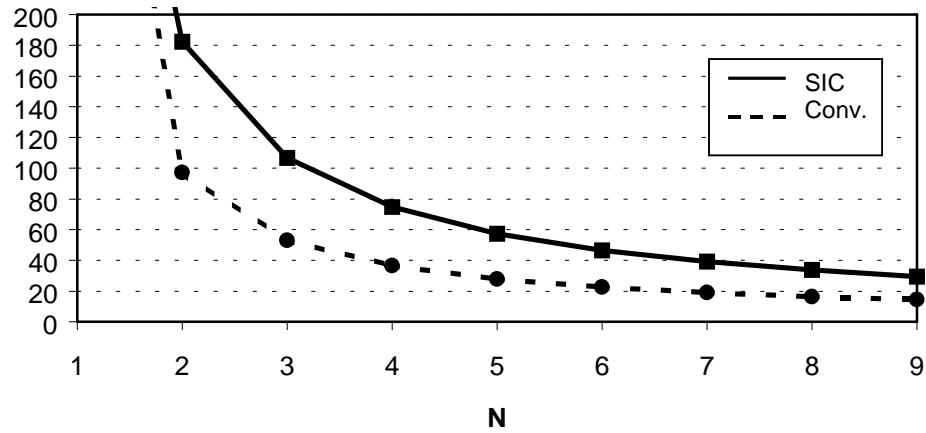


Gráfico 6.3: "Throughputs" (em kbps) obtidos para SIC e detecção convencional

Ganho em "Throughput" vs. N

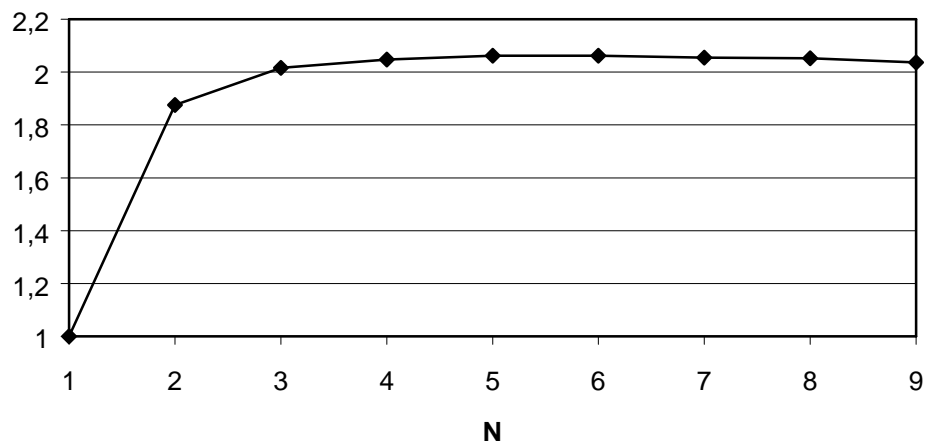


Gráfico 6.4: Ganhos obtidos com SIC

6.3 Comparação de SIC e “Scheduling” com Classe Única

Como vimos, os esquemas SIC e “scheduling” têm em comum o fato de reduzirem a MAI e permitir substanciais ganhos de capacidade em função disso. Mesmo tratando-se de esquemas de naturezas diferentes, enquanto SIC é uma técnica de detecção multi-usuários, o “scheduling” é uma maneira diferente de transmitir os sinais dos usuários, eles podem ser comparados.

Neste momento, é interessante (apesar de não termos, ainda, obtido uma modelagem de SIC para o caso multi-classes) desenvolvermos uma metodologia para comparar os ganhos provenientes da utilização dos esquemas SIC e “scheduling” em CDMA. A seguir, apresentaremos uma comparação dos esquemas SIC e “scheduling” para o caso de classe única de usuários de dados (fazendo $N_1=0$ na modelagem de “scheduling” do capítulo anterior).

Em primeiro lugar, é preciso analisar como se relacionam os limites de capacidade que utilizamos em cada situação, ou seja, equação 5.17, para o “scheduling”, que resulta do controle perfeito de potência, e equação 6.24, para SIC, cuja restrição de capacidade é imposta por limitação da faixa dinâmica de sinal no receptor. Isso será feito deduzindo-se expressões de capacidade para um mesmo sistema segundo os dois critérios e simplesmente comparando-se as expressões resultantes. Uma vez que o primeiro critério só se aplica para

controle perfeito de potência, o sistema usado para a comparação será desse tipo.

Na situação de classe única, todos os usuários são recebidos com potência hP .

Dessa forma, temos:

$$hP = \gamma' \cdot \{(N-1) \cdot hP + P_{0, \text{total}}\}$$

Isso pode ser escrito como:

$$hP \cdot (1 + \gamma') = \gamma' \cdot \{N \cdot hP + P_{0, \text{total}}\} \Rightarrow$$

$$\frac{1 + \gamma'}{N} = \gamma' \cdot \left\{ 1 + \frac{P_{E, \text{total}}}{N \cdot hP} + \frac{\eta_0 \cdot W}{N \cdot hP} \right\}$$

Substituindo:

$$\gamma' = \gamma \cdot \frac{R}{W} = \frac{1}{\frac{W}{R \cdot \gamma}}$$

Resulta:

$$1 + \frac{1}{\frac{W}{R \cdot \gamma}} = \frac{1}{\frac{W}{R \cdot \gamma}} \cdot \left\{ 1 + \frac{P_{E, \text{total}}}{N \cdot hP} + \frac{\eta_0 \cdot W}{N \cdot hP} \right\}$$

Observando que:

$$1 + \gamma' = \frac{\frac{W}{R \cdot \gamma} + 1}{\frac{W}{R \cdot \gamma}} = \gamma' \cdot \left(\frac{W}{R \cdot \gamma} + 1 \right)$$

Resulta:

$$\frac{\frac{W}{R \cdot \gamma} + 1}{N} = 1 + \frac{P_{E, total}}{N \cdot hP} + \frac{\eta_0 \cdot W}{N \cdot hP}$$

e, portanto:

$$\frac{N}{\frac{W}{R \cdot \gamma} + 1} = 1 - \frac{P_{E, total}}{\left(\frac{W}{R \cdot \gamma} + 1\right) \cdot hP} - \frac{\eta_0 \cdot W}{\left(\frac{W}{R \cdot \gamma} + 1\right) \cdot hP}$$

que é a expressão de capacidade do capítulo anterior, simplificada para uma classe única de usuários idênticos.

Substituindo $P_{E, total}$ pelo resultado obtido através de [Kim93]:

$$\frac{N}{\frac{W}{R \cdot \gamma} + 1} = 1 - \frac{[12g(2R) + 24g(4R) + \dots] \cdot N \cdot hP}{\left(\frac{W}{R \cdot \gamma} + 1\right) \cdot hP} - \frac{\eta_0 \cdot W}{\left(\frac{W}{R \cdot \gamma} + 1\right) \cdot hP}$$

Resulta, finalmente:

$$\begin{aligned} \frac{N}{\frac{W}{R \cdot \gamma} + 1} &= \frac{1}{1 + [12g(2R) + 24g(4R) + \dots]} \cdot \left[1 - \frac{\eta_0 \cdot W}{\left(\frac{W}{R \cdot \gamma} + 1\right) \cdot hP} \right] = \\ &\frac{1}{1+f} \cdot \left[1 - \frac{\eta_0 \cdot W}{\left(\frac{W}{R \cdot \gamma} + 1\right) \cdot p \cdot \min\{h_i\}} \right] \end{aligned} \quad (6.29)$$

(idêntica à expressão 5.16, para uma classe única). Variando-se a população de N máximo até 1, obtemos as taxas máximas para cada população, considerando todos os usuários à mesma taxa. Uma hipótese que se faz ao utilizarmos a expressão acima para todas as populações, é de que o usuário mais limitado, que corresponde a $h_{\min, N}$, permanece na célula mesmo

reduzindo-se o número de usuários. Logo, o valor h_{\min} p é o mínimo, correspondendo ao pior caso.

Pelo segundo critério de capacidade máxima, descrito em [Vite95], a limitação pode ser escrita como, no máximo:

$$(N-1) \cdot hP + P_{E, \text{total}} + \eta_0 \cdot W = I_0 \cdot W$$

para:

$$\frac{\eta_0 \cdot W}{I_0 \cdot W} = \eta$$

Essa expressão é equivalente a:

$$N \cdot hP + P_{E, \text{total}} + \eta_0 \cdot W = I_0 \cdot W + hP \Rightarrow$$

$$N \cdot \frac{hP}{I_0 \cdot W} + \frac{P_{E, \text{total}}}{I_0 \cdot W} + \frac{\eta_0 \cdot W}{I_0 \cdot W} = 1 + \frac{hP}{I_0 \cdot W}$$

Dessa forma, como já apresentado:

$$\frac{hP}{I_0 \cdot W} = \gamma'$$

Então, substituindo:

$$N \cdot \gamma' + \frac{P_{E, \text{total}}}{I_0 \cdot W} + \eta = 1 + \gamma' \Rightarrow$$

$$N \cdot \frac{\gamma'}{1 + \gamma'} + \frac{P_{E, \text{total}}}{I_0 \cdot W \cdot (1 + \gamma')} + \frac{\eta}{1 + \gamma'} = 1$$

Como anteriormente, temos:

$$\frac{N}{\frac{W}{R \cdot \gamma} + 1} + \frac{P_{E, total}}{I_0 \cdot W \cdot (1 + \gamma')} + \frac{\eta}{1 + \gamma'} = 1$$

Substituindo $P_{E, total}$, novamente:

$$\frac{N}{\frac{W}{R \cdot \gamma} + 1} = 1 - \frac{[12g(2R) + 24g(4R) + \dots] \cdot N \cdot hP}{\left(\frac{W}{R \cdot \gamma} + 1\right) \cdot hP} - \frac{\eta}{1 + \gamma'}$$

e, portanto:

$$\frac{N}{\frac{W}{R \cdot \gamma} + 1} = \frac{1}{1 + [12g(2R) + 24g(4R) + \dots]} \cdot \left[1 - \frac{\eta}{1 + \gamma'}\right] = \frac{1}{1 + f} \cdot \left[1 - \frac{\eta}{\left(\frac{W}{R \cdot \gamma} + 1\right) \cdot \gamma'}\right] \quad (6.30)$$

Comparando as limitações das duas expressões de capacidade:

$$\frac{\eta_0 \cdot W}{p \cdot \min\{h_i\}} \quad e \quad \frac{\eta}{\gamma'} \quad (6.31)$$

observamos que, multiplicando e dividindo a primeira por $1/I_0 \cdot W$, temos:

$$\frac{\left(\frac{\eta_0 \cdot W}{I_0 \cdot W}\right)}{\left(\frac{p \cdot \min\{h_i\}}{I_0 \cdot W}\right)} \equiv \frac{\eta}{\gamma'}$$

Logo, tratam-se das mesmas limitações (para um esquema de detecção convencional) e a comparação das taxas máximas obtidas através de SIC e “scheduling” pode ser feita, desde que os parâmetros de sistema escolhidos garantam, em modo convencional, a igualdade anterior. Os resultados referentes ao “scheduling” serão obtidos através da expressão 6.29, adaptada, e os resultados do SIC, da expressão 6.24. Os resultados para o caso

convencional poderão ser obtidos através das duas limitações de capacidade, devendo resultar iguais.

Observar que, ao utilizarmos a expressão 6.29, estamos calculando as taxas máximas para uma determinada configuração de usuários na célula (ou uma “fotografia” da célula), com distâncias à rádio base bem definidas (e que não variam), representadas pelo vetor \mathbf{h} . Enquanto isso, a expressão 6.24 resulta de uma média, em que cada usuário i pode ocupar posições que variam em distância de 0 a R da rádio base (com suas respectivas probabilidades) e em coordenadas angulares, de 0 a 2π .

A metodologia para obtermos as taxas máximas nos casos convencional, SIC e “scheduling” será a seguinte: na expressão 6.29, de capacidade do esquema convencional, utilizaremos um valor típico de η , de zero (ruído desprezível) a 0,2, conforme [Vite95]. Para esse valor de η , calcularemos os QoS máximos, γ'_{\max} , para cada configuração, ou seja, variando-se o número de usuários de 1 a N_{\max} (determinado pelo γ' necessário para se obter a taxa mínima, $R_{\min}=14,4$ kbps). Na expressão 6.28 de capacidade em modo convencional, substituiremos o termo $\frac{\eta_0 \cdot W}{p \cdot h_{\min}}$ pelo valor de $\frac{\eta}{\gamma'_{\max}}$ de cada configuração de usuários, de 1 a N_{\max} (observar que γ'_{\max} varia de uma configuração para outra). Dessa forma, para cada configuração, as limitações de capacidade impostas pelas duas modelagens serão idênticas, ocorrendo o mesmo para as taxas máximas obtidas no caso convencional (calculando-se as taxas máximas

através das expressões 6.29 e 6.30, limitadas conforme apresentado). Esse fato será confirmado através de resultados numéricos. Em seguida, com os mesmos valores de η e $\frac{\eta_0 \cdot W}{p \cdot h_{\min}}$ considerados para o esquema convencional, para cada configuração de usuários, de 1 a N_{\max} , resolveremos as expressões 6.24 e 6.29 (adaptada), referentes aos esquemas SIC e “scheduling”, respectivamente, determinando as suas taxas máximas e os ganhos de SIC e “scheduling” em relação ao modo convencional.

Observar que, ao fazermos $\frac{\eta_0 \cdot W}{p \cdot h_{\min}}$ variar de uma configuração para outra de usuários, estamos deixando de atender à premissa de que o usuário mais limitado se mantém na célula, mesmo com as reduções de população. De fato, ao variarmos esse termo, estamos variando a configuração de usuários na célula, de modo a acompanharmos um resultado médio, obtido pela expressão 6.24, que está variando (γ'_{\max}).

Se, na expressão 6.29 de capacidade em modo convencional, substituíssemos o termo $\frac{\eta_0 \cdot W}{p \cdot h_{\min}}$ pelo valor $\frac{\eta}{\min(\gamma'_{\max})}$, onde o denominador é o valor mínimo de γ'_{\max} dentre os obtidos através da expressão 6.24 (esse valor corresponde à configuração máxima na expressão 6.29, ou seja, N_{\max}), teríamos $\frac{\eta_0 \cdot W}{p \cdot h_{\min}}$ constante, que leva em conta sempre o mesmo usuário mais limitado, que não varia, apesar das reduções de população na célula. Calcularemos os ganhos de “scheduling” segundo essas duas abordagens de comparação. Como vimos,

essa última corresponde ao pior caso, o que será verificado através dos resultados numéricos.

Para efeito de determinação dos limites de potência máxima de transmissão correspondentes aos limites de capacidade $\frac{\eta_0 \cdot W}{p \cdot h_{\min}}$ de cada situação (conforme capítulo 5), e devido ao fato de que, como comentado, uma das modelagens corresponde a uma média, enquanto a outra, a uma “fotografia” da célula, devemos considerar h_{\min} , na modelagem para a “fotografia”, como o menor h possível, ou seja, para uma “fotografia” de pior caso, ou seja, em que há um usuário na borda da célula. Portanto, $h_{\min}=h_{\text{borda}}$ e utilizaremos $h_{\text{borda}}=0,1$.

6.4 Resultados Numéricos da Comparação com Classe Única

Iniciamos calculando os ganhos de SIC e “scheduling” para a condição de ruído térmico desprezível. Observar que essa condição resulta $\eta=0$, o que significa indisponibilidade nula do sistema.

Comparação de Ganhos de "Scheduling" e SIC

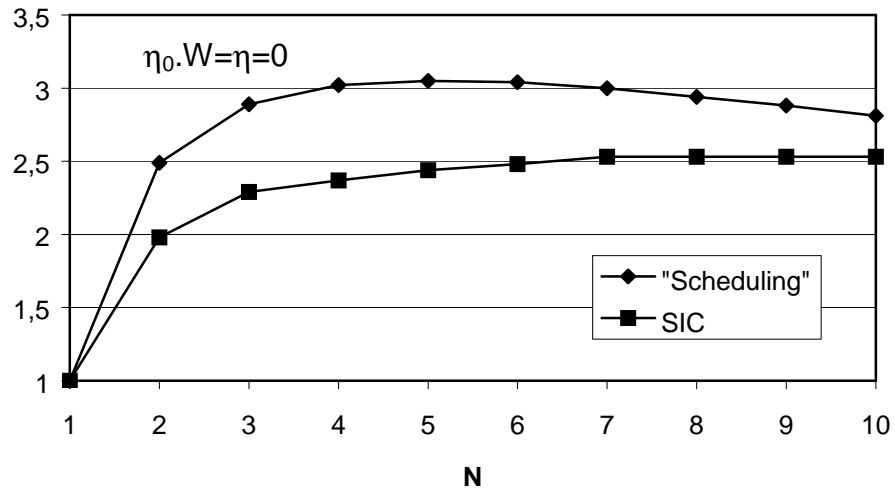


Gráfico 6.5: Ganhos obtidos com SIC e "scheduling"

"Throughputs" obtidos com SIC, "Scheduling" e Convencionais

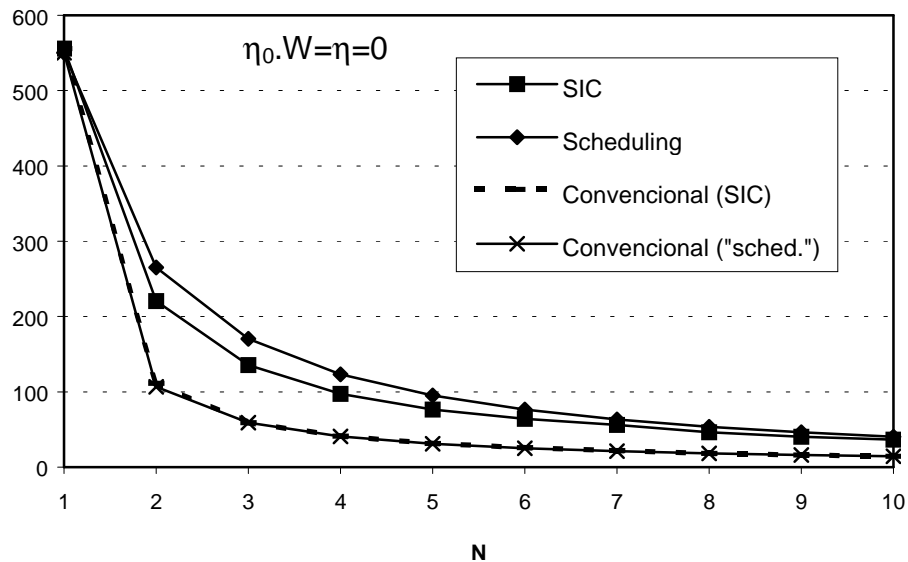


Gráfico 6.6: "Throughputs" (em kbps) para modos SIC, "scheduling" e convencional (calculado segundo duas modelagens)

Observar que a curva de ganho com SIC se refere ao usuário mais próximo da rádio base, ou seja, o que tem máxima interferência do tipo MAI (pior caso). No gráfico 6.6, as curvas “Convencional (SIC)” e “Convencional (“sched.”) se referem às taxas em modo convencional calculadas, respectivamente, segundo a modelagem de limitação por indisponibilidade η e pela relação $\frac{\eta_0 \cdot W}{p \cdot h_{\min}}$. Como havíamos comentado, os resultados são idênticos, mostrando que as limitações nos dois casos são as mesmas, e que a comparação de ganhos é exata.

Comparamos, a seguir, resultados obtidos com SIC e “scheduling” para casos de ruído térmico não nulo. Nessa condição, conforme já apresentado, há duas abordagens de comparação possíveis, em virtude de uma diferença qualitativa entre as modelagens consideradas. Na modelagem por limitação de $\frac{\eta_0 \cdot W}{p \cdot h_{\min}}$, esse termo corresponde a um “usuário mais limitado” em uma configuração bem definida de usuários na célula (“fotografia”). Se esse termo mais limitado se mantiver à medida que a população é reduzida de N_{\max} a 1, como fizemos no capítulo 5, estaremos considerando uma análise de pior caso, em que $\frac{\eta_0 \cdot W}{p \cdot h_{\min}}$ será igual a $\frac{\eta}{\min(\gamma'_{\max})}$ e não a $\frac{\eta}{\gamma'_{\max}}$ (em modo convencional), onde γ'_{\max} varia de configuração para configuração. Nesse caso, as limitações de capacidade nas duas modelagens serão iguais apenas para N_{\max} , nos demais,

a limitação de $\frac{\eta_0 \cdot W}{p \cdot h_{\min}}$ será maior. Por isso, o ganho de “scheduling” obtido

dessa forma será denominado de “scheduling de pior caso”.

A outra abordagem considera que as “fotografias” podem variar, mantendo

$\frac{\eta_0 \cdot W}{p \cdot h_{\min}}$ igual a $\frac{\eta}{\gamma'_{\max}}$ em todas as situações.

A seguir, apresentamos resultados obtidos para $\eta=0,05$. Primeiramente, fazendo:

$$\frac{\eta_0 \cdot W}{p \cdot \min\{h_i\}} = \frac{\eta}{\gamma'_{\max, i}}$$

temos:

$\eta=0,05$						
N	1	2	3	5	7	9
G (sched-1.)	1,00	2,09	2,06	1,68	1,42	1,20
G (SIC)	1,00	1,97	2,12	2,21	2,23	2,23
$\gamma'_{\max, \text{SIC}}$	3,08	1,16	0,69	0,38	0,26	0,19
$\eta_0 W / (h_{\min} p)$	0,016	0,085	0,153	0,29	0,429	0,565
R (SIC)	535,64	201,53	119,88	66,02	45,17	34,22
T (sched-1.)	540,36	211,15	115,30	49,30	28,00	18,00
R (conv.)	535,64	101,99	56,541	29,87	20,25	15,34
R (conv.)	540,36	101,02	55,97	29,34	19,71	15,00

Tabela 6.2: Comparação entre SIC e “scheduling” para $\eta=0,05$

Considerando o “scheduling de pior caso”, ou seja, fazendo:

$$\frac{\eta_0 \cdot W}{p \cdot \min\{h_i\}} = \frac{\eta}{\min\{\gamma'_{\max, i}\}}$$

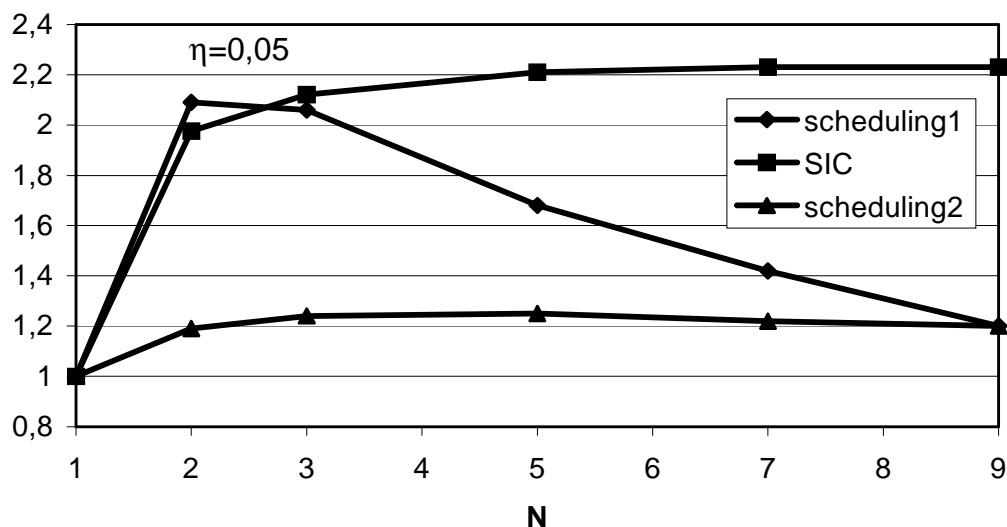
resulta:

$\eta=0,05$						
N	1	2	3	5	7	9
G (sched-2.)	1,00	1,19	1,24	1,25	1,22	1,20
G (SIC)	1,00	1,976	2,12	2,21	2,23	2,23
γ_{\max} . SIC	3,08	1,16	0,69	0,38	0,26	0,19
$\eta_0 W/(h_{\min} p)$	0,565	0,565	0,565	0,565	0,565	0,565
$p(h_{\min}=0,1)$	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17
R (SIC)	535,64	201,53	119,88	66,02	45,17	34,22
T (sched-2.)	189,17	92,82	60,72	35,10	24,14	18,00
R (conv.)	535,64	101,99	56,54	29,87	20,25	15,34
R (conv.)	189,17	78,00	48,96	28,08	19,78	15,00

Tabela 6.3: Comparação entre SIC e “scheduling de pior caso” para $\eta=0,05$

Observar que os resultados com SIC são sempre obtidos para o usuário mais próximo da rádio base.

Comparação de Ganhos de "Scheduling" e SIC

Gráfico 6.7: Comparação entre SIC, “scheduling” e “scheduling de pior caso” para $\eta=0,05$

No gráfico anterior, “scheduling2” corresponde ao “scheduling de pior caso”.

Fazendo os mesmos cálculos para $\eta=0,02$, resulta:

$\eta=0,02$						
N	1	2	3	5	7	9
G (sched-1.)	1,00	2,42	2,66	2,61	2,37	2,12
G (SIC)	1,00	2,02	2,22	2,32	2,37	2,38
γ'_{\max} SIC	3,12	1,22	0,74	0,41	0,28	0,21
$\eta_0 W / (h_{\min} p)$	0,006	0,032	0,06	0,112	0,166	0,22
R (SIC)	542,59	212,83	129,43	71,58	49,51	37,70
T (sched-1.)	549,70	255,90	155,00	80,26	49,47	33,50
R (conv.)	542,59	105,36	58,30	30,85	20,89	15,84
R (conv.)	549,70	105,74	58,27	30,75	20,87	15,80

Tabela 6.4: Comparação entre SIC e “scheduling” para $\eta=0,02$

e, para o pior caso:

$\eta=0,02$						
N	1	2	3	5	7	9
G (sched-2.)	1,00	1,87	2,11	2,22	2,19	2,12
G (SIC)	1,00	2,02	2,22	2,32	2,37	2,38
γ'_{\max} SIC	3,12	1,22	0,74	0,41	0,28	0,21
$\eta_0 W / (h_{\min} p)$	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
$p (h_{\min}=0,1)$	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61
R (SIC)	542,59	212,83	129,43	71,58	49,51	37,70
T (sched-2.)	375,70	182,60	118,36	67,20	45,45	33,50
R (conv.)	542,59	105,36	58,30	30,85	20,89	15,84
R (conv.)	375,70	97,64	56,09	30,27	20,75	15,80

Tabela 6.5: Comparação entre SIC e “scheduling de pior caso” para $\eta=0,02$

Comparação de Ganhos de "Scheduling" e SIC

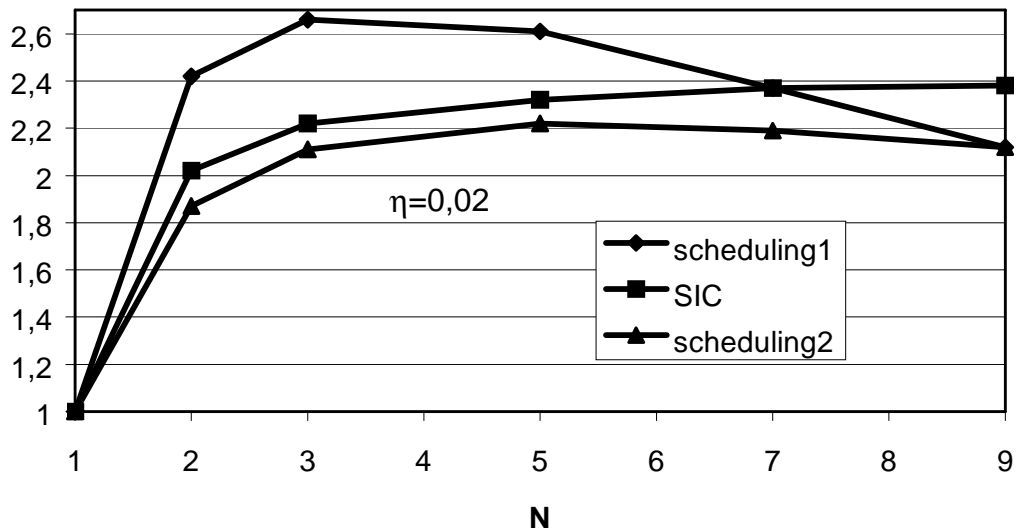


Gráfico 6.8: Comparação entre SIC, "scheduling" e "scheduling de pior caso" para $\eta=0,02$

Podemos concluir que, apesar de resultar ganhos maiores no caso de $\eta_0=0$, os ganhos do modo "scheduling" exigem níveis de potências mais elevados que os ganhos obtidos com o esquema SIC, primeiro, por características diferentes dos próprios controles de potência empregados nos dois casos (como havíamos mencionado, o controle de potência convencional, também utilizado no "scheduling", resulta níveis de potências mais elevados na célula) e, além disso, porque a solução de maximização de taxas através de "scheduling" requer potências instantâneas máximas que são N_2/k_2 vezes maiores que as praticadas em modo convencional, na mesma configuração. Isso significa que, se os níveis de potência da célula estiverem limitados a valores relativamente

pequenos, como no caso de $\eta=0,05$, os ganhos obtidos através SIC serão maiores que os possíveis com “scheduling”.

6.5 Modelagem dos esquemas SIC, “Scheduling” e Convencional com “Dual-Class”

Consideraremos, agora, o caso de multi-classes, em particular, como feito nos capítulos anteriores, com duas classes de serviço, voz e dados, a primeira a taxa constante e a segunda a taxas variáveis. Nosso objetivo, novamente, é determinar as taxas máximas que se pode obter para uma configuração dada, usando-se o esquema de detecção SIC aplicado às duas classes e comparar esse resultado ao obtido com detecção convencional. Em seguida, comparar os resultados de SIC e “scheduling”, como feito anteriormente. A modelagem de multi-classes no modo convencional será idêntica à apresentada no capítulo 5. Iniciaremos definindo algumas relações entre as classes de usuários no modo SIC e em seguida desenvolvendo a modelagem de capacidade para esse modo.

No caso de classe única, o controle de potências no caso SIC ordena as potências dos móveis em função de suas distâncias à rádio base, como vimos. Esse controle ainda implica uma relação constante, igual a $(1+\gamma')$, entre as potências de um móvel e o próximo. Isso ocorre, porque todos os móveis transmitem a mesma taxa e com mesma qualidade de serviço, γ . Existindo duas classes de usuários distribuídos uniformemente na célula, a relação entre

as potências de quaisquer dois usuários consecutivos (em termos de localização) será constante (e as potências serão consecutivas, na ordenação de potências realizada na rádio base) apenas se eles pertencerem a mesma classe. Se dois móveis vizinhos pertencerem a classes diferentes, suas potências não serão “consecutivas” na ordenação de potências e a relação entre as potências não segue uma proporção constante. Isso se deve ao fato de que, para atender aos seus requisitos de taxa e QoS, cada classe deve transmitir a níveis de potência bastante diferentes entre si, que não dependem mais, apenas das distâncias.

Consideraremos que, apesar de as duas classes serem distribuídas uniformemente na célula, os níveis de potência recebidos na rádio base são tais que os primeiros N_2 usuários com potências mais fortes são os usuários de Classe 2 (independente de serem os N_2 usuários mais próximos, uma vez que têm requisitos de taxa e QoS maiores). Os N_1 usuários seguintes pertencem à Classe 1, de voz, a taxa constante. Dessa forma, haverá N_1+N_2 usuários na célula, distribuídos uniformemente e ordenados, na rádio base, segundo suas potências recebidas, cujos valores dependem, fundamentalmente, de suas especificações de taxa e QoS (por classe). Observar que dentro da mesma classe, é possível ordenar as potências dos móveis em função das localizações na célula.

Pode-se mostrar, facilmente, que as potências dos usuários valem:

$$h_i \cdot P_i = \gamma'_2 \cdot (\gamma'_2 + 1)^{N_2-i} \cdot (\gamma'_1 + 1)^{N_1} \cdot P_{0, \text{total}} \quad (6.31)$$

para usuários de dados ($i=1$ a N_2). Observar que, nessa expressão, consideramos o fato de os usuários de voz serem os últimos na ordenação de potências, o que implica que todos os usuários de voz constituirão uma parcela de MAI para qualquer um dos usuários de dados.

Para os usuários de voz, temos:

$$h_i \cdot P_i = \gamma'_1 \cdot (\gamma'_1 + 1)^{N_2-i} \cdot P_{0,\text{total}} \quad (6.32)$$

com i de 1 a N_1 . Na detecção dos usuários de voz, todos os usuários de dados serão cancelados.

Com relação aos parâmetros γ' , qualidades de serviço antes da detecção, como sabemos, esses valores dependem da qualidade de serviço γ característica, necessária na detecção de cada tipo de serviço (valores típicos possíveis são γ igual a 5 e 7, para voz e dados, respectivamente) e da taxa de bits do usuário. Portanto, a relação entre γ'_1 e γ'_2 , das classes 1 e 2, respectivamente, depende da taxa de dados, uma vez que a taxa de voz é constante.

Nosso objetivo será, fixados os valores de N_1 , N_2 e γ'_1 , determinar o valor máximo de γ'_2 para algumas configurações e, assim, as taxas máximas de dados com esquema SIC.

A seguir, estenderemos a modelagem de capacidade com detecção SIC para o caso de duas classes com a ordenação de usuários já descrita. Como considerado anteriormente, pelo teorema da superposição, a interferência

externa pode ser escrita como a interferência externa gerada pelos usuários de Classe 1 mais a interferência externa gerada pelos usuários de Classe 2. Consideraremos um sistema multi-celular homogêneo.

Iniciando pela parcela de interferência externa correspondente aos usuários de Classe 2, temos:

$$\begin{aligned}
 P_{E,2} &= \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{i=1}^{N_2} \iint h_i P_{i,2} \cdot \frac{r^4}{x^4} \cdot f_i(r)_2 \cdot d\theta \cdot dr = \\
 &= \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{i=1}^{N_2} \int_0^R \int_0^{2\pi} \gamma'_2 \cdot (\gamma'_2 + 1)^{N_2-i} \cdot (\gamma'_1 + 1)^{N_1} \cdot P_{0,\text{total}} \cdot \frac{r^4}{x^4} \cdot \binom{N_2}{i} \cdot i \cdot \left(\frac{r^2}{R^2}\right)^{i-1} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^{N_2-i} \cdot \frac{2 \cdot r}{R^2} \cdot d\theta \cdot dr = \\
 &= \int_0^R P_{0,\text{total}} \cdot \frac{\gamma'_2 \cdot (\gamma'_1 + 1)^{N_1} \cdot r^5}{\pi \cdot R^2} \cdot f(r,d) \cdot \sum_{i=1}^{N_2} (\gamma'_2 + 1)^{N_2-i} \binom{N_2}{i} \cdot i \cdot \left(\frac{r^2}{R^2}\right)^{i-1} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^{N_2-i} \cdot dr
 \end{aligned}$$

Consideramos que $f(r,d)$ é definido como anteriormente. Em seguida, escrevendo a interferência externa gerada pelos usuários de Classe 1, temos:

$$\begin{aligned}
 P_{E,1} &= \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{i=1}^{N_1} \iint h_i P_{i,1} \cdot \frac{r^4}{x^4} \cdot f_i(r)_1 \cdot d\theta \cdot dr = \\
 &= \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{i=1}^{N_1} \int_0^R \int_0^{2\pi} \gamma'_1 \cdot (\gamma'_1 + 1)^{N_1-i} \cdot P_{0,\text{total}} \cdot \frac{r^4}{x^4} \cdot \binom{N_1}{i} \cdot i \cdot \left(\frac{r^2}{R^2}\right)^{i-1} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^{N_1-i} \cdot \frac{2 \cdot r}{R^2} \cdot d\theta \cdot dr = \\
 &= \int_0^R P_{0,\text{total}} \cdot \frac{\gamma'_1 \cdot r^5}{\pi \cdot R^2} \cdot f(r,d) \cdot \sum_{i=1}^{N_1} (\gamma'_1 + 1)^{N_1-i} \binom{N_1}{i} \cdot i \cdot \left(\frac{r^2}{R^2}\right)^{i-1} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^{N_1-i} \cdot dr
 \end{aligned}$$

Da mesma forma como ocorreu para o caso de uma classe única, os somatórios anteriores têm formas fechadas e serão, portanto, substituídos pelas mesmas.

No caso de duas classes, temos que $P_E = P_{E,1} + P_{E,2}$ e, a partir dessa expressão, determinamos $P_{E,total}$ e $P_{0,total}$, como anteriormente. Falta-nos, ainda, determinar P_{MAI} , o que será visto a seguir.

Uma vez que, por classe, as potências seguem um controle de potência que estabelece uma relação constante entre potências vizinhas, podemos determinar a P_{MAI} considerando-a igual a soma de duas progressões geométricas, uma para cada classe.

Dessa forma, pode-se mostrar que:

$$P_{MAI,max} = P_{MAI,2,max} + P_{MAI,1,max} = (\gamma'_1 + 1)^{N_1} \cdot \{(\gamma'_2 + 1)^{N_2-1} - 1\} \cdot P_{0,total} +$$

$$+ \{(\gamma'_1 + 1)^{N_1} - 1\} \cdot P_{0,total} \quad (6.33)$$

e ocorre para o primeiro usuário a ser detectado (de Classe 2).

Limitando-se a relação entre interferência total (interferência total interna mais total externa e mais ruído térmico) por ruído térmico a $1/\eta$ e desenvolvendo essa expressão de maneira análoga ao exposto para o caso de classe única, resulta:

$$\sum_{\substack{\text{células} \\ \text{vizinhas}}} \int_0^R \frac{\gamma'_2 \cdot (\gamma'_1 + 1)^{N_1} \cdot r^5 \cdot N_2}{\pi \cdot R^2} \cdot f(r, d) \cdot \left[\gamma'_2 \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + 1 \right]^{N_2-1} \cdot dr +$$

$$+ \sum_{\substack{\text{células} \\ \text{vizinhas}}} \int_0^R \frac{\gamma'_1 \cdot r^5 \cdot N_1}{\pi \cdot R^2} \cdot f(r, d) \cdot \left[\gamma'_1 \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + 1 \right]^{N_1-1} \cdot dr \leq \quad (6.34)$$

$$\leq 1 - \{(\gamma'_2 + 1)^{N_2-1} \cdot (\gamma'_1 + 1)^{N_1}\} \cdot \eta$$

que é a expressão de capacidade com duas classes de usuários e esquema de detecção SIC.

Para o caso convencional, com duas classes de usuários, distribuídos uniformemente na célula, a expressão de capacidade, para a Classe 1 (pior caso de P_{MAI}) é:

$$(N_1 - 1) \cdot \gamma'_1 + N_2 \cdot \gamma'_2 + \left(\gamma'_1 \cdot \frac{N_1}{\pi \cdot R^2} + \gamma'_2 \cdot \frac{N_2}{\pi \cdot R^2} \right) \cdot \sum_{\substack{\text{células} \\ \text{vizinhas}}} \int_0^R r^5 \cdot f(r, d) \cdot dr \leq 1 - \eta \quad (6.35)$$

que será utilizada na comparação entre SIC e detecção convencional.

6.6 Resultados Numéricos com Duas Classes

Primeiramente, determinamos, numericamente, os ganhos do esquema de detecção SIC, em relação ao convencional, para duas configurações de células com duas classes de usuários e valores de η variando de 0 a 0,05.

Ganho de "Throughput" com SIC e Duas Classes
 $N_1=3$

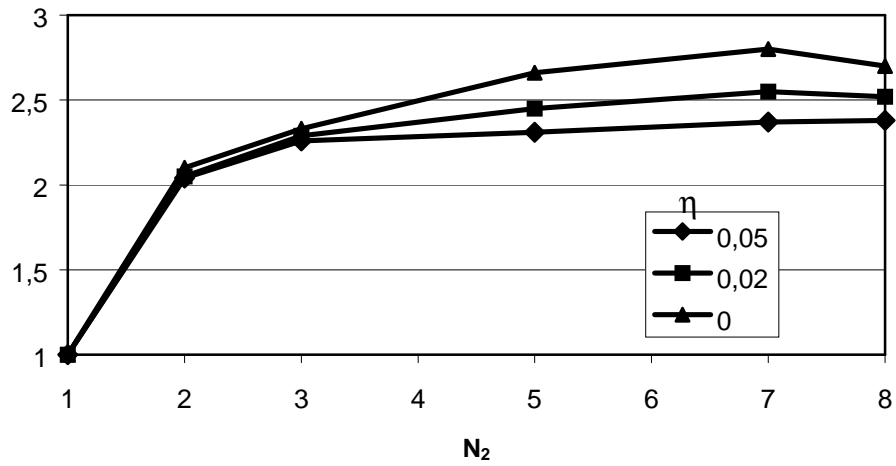


Gráfico 6.9: Comparação entre SIC e esquema convencional para duas classes de usuários e $N_1=3$

Ganho de "Throughput" com SIC e Duas Classes
 $N_1=8$

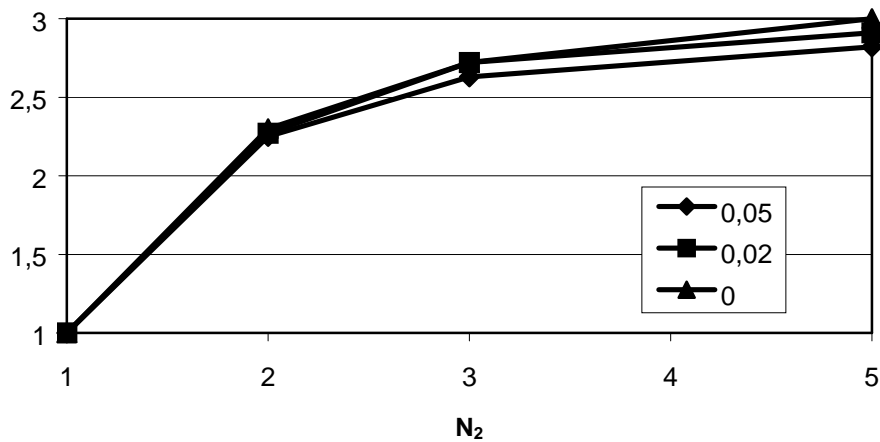


Gráfico 6.10: Comparação entre SIC e esquema convencional para duas classes de usuários e $N_1=8$

Em seguida, comparamos os resultados dos esquemas SIC e “scheduling”, para $\eta=0,02$ e as mesmas configurações de usuários, conforme a seguir, fazendo:

$$\frac{\eta_0 \cdot W}{p \cdot \min\{h_i\}} = \frac{\eta}{\gamma'_{2, \text{conv}}}$$

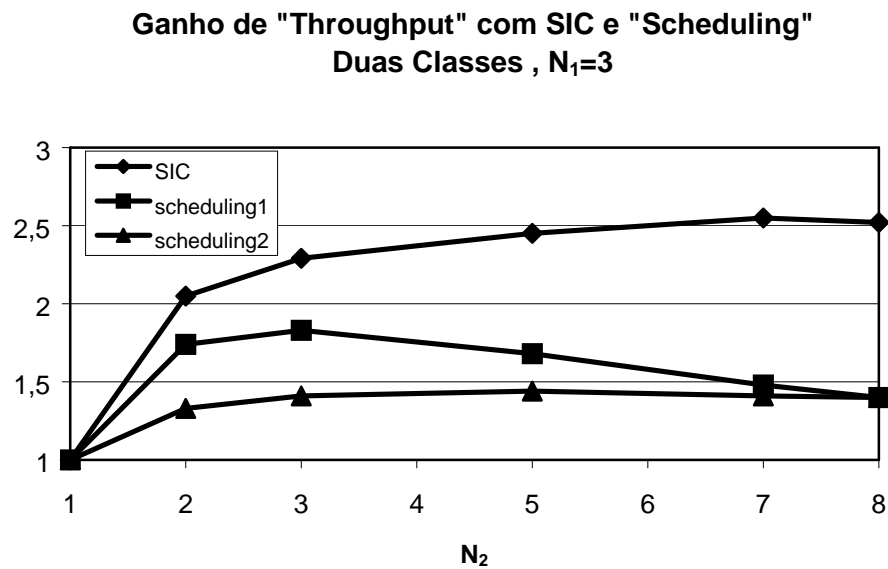


Gráfico 6.11: Comparação entre SIC e “scheduling” para duas classes de usuários e $N_1=3$

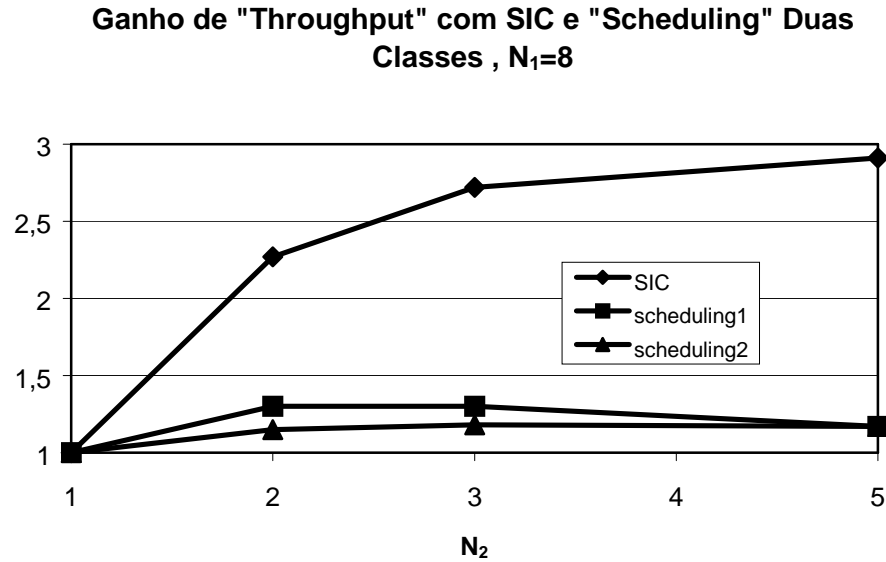


Gráfico 6.12: Comparação entre SIC e “scheduling” para duas classes de usuários e $N_1=8$

Nos gráficos 6.11 e 6.12, os termos “scheduling1” e “scheduling2” correspondem, novamente, aos ganhos de “scheduling” calculados para o usuário mais limitado variando e pior caso, respectivamente.

Como se observa, para limitações de potência máxima mais severas, os resultados apresentados pelo esquema SIC se tornam melhores que os obtidos com “scheduling”. Como já comentado, isso se deve aos níveis de potência necessários com “scheduling” que são bem mais elevados.

No capítulo seguinte, estabelecemos algumas conclusões resultantes desse trabalho.

7.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Como vimos, os sistemas de comunicação móvel futuros, ou de terceira geração, deverão apresentar flexibilidade e grande capacidade. A flexibilidade relaciona-se à possibilidade de suportar uma gama extensa de tipos de serviços, cada um deles com características próprias de taxa, qualidade de serviço e sensibilidade a atrasos. Com relação à capacidade, os sistemas deverão estar aptos a suportar serviços com requisitos de taxa e qualidade mais elevados do que os utilizados atualmente para a voz, permitindo, inclusive, que as taxas de alguns usuários sejam maximizadas. Pudemos observar, ao longo do trabalho, que os dois requisitos, de flexibilidade e

capacidade, estarão relacionados, ou seja, a capacidade dos sistemas somente poderá ser maximizada se os mesmos forem capazes de atender a cada classe de serviço levando em conta os seus requisitos mínimos de desempenho, particulares para cada classe, o que requer controle de potências.

Primeiramente, a partir das observações anteriores, modelamos a capacidade estática de sistemas DS/CDMA de múltipla taxa e multi-classes, mais especificamente, no caso "dual-class" (voz e dados), e determinamos as populações máximas ou taxas máximas por classe disponíveis, conforme resultados da literatura.

Em seguida, duas técnicas de maximização de capacidade foram analisadas no caso "dual-class": "scheduling" e SIC. Ambas representam modificações no esquema convencional de DS/CDMA, consistindo na utilização de diferentes esquemas de transmissão de dados e detecção, respectivamente. Nos dois casos, pudemos confirmar a existência de ganhos de "throughput" total significativos, originados pela redução da interferência MAI.

O esquema "scheduling", pouco descrito na literatura, foi amplamente investigado, considerando-se, inicialmente, o caso ideal de célula única, sem limitação de potência e com controle perfeito de potência, para o qual o "scheduling" pôde proporcionar, segundo os resultados obtidos, ganhos da ordem de 2 a 6, em relação ao "throughput" total do modo convencional, para

configurações mediantemente a pouco povoadas por usuários de voz. Em seguida, consideramos o caso de controle imperfeito de potências e a modelagem probabilística do problema, segundo a abordagem log-normal. Nesse caso, pudemos verificar diminuições significativas nos ganhos, à medida que a imperfeição no controle de potências aumenta, e ganhos da ordem de 1,5 a 3,5 para $\sigma=1$ dB.

Em seguida, estendemos a modelagem do esquema “scheduling” para o caso multi-celular, considerando um sistema homogêneo, e determinamos o impacto em capacidade devido à interferência externa. Substituindo esse resultado na expressão de capacidade do caso uni-celular, e considerando que, num ambiente multi-célular, as potências de transmissão devem ser limitadas a valores máximos admissíveis, obtivemos ganhos em modo “scheduling” da ordem de 1,2 a 1,6, para potência máxima de transmissão da ordem de 2 W. Propusemos, ainda, limitar a área de cobertura da célula para serviços de dados a taxas altas, o que melhorou o desempenho do sistema como um todo.

Finalmente, consideramos o esquema SIC, estendendo a modelagem disponível na referência considerada também para o caso “dual-class”. Conforme verificado, quando comparada à capacidade máxima obtida com esquema convencional, essa técnica permite ganhos da ordem de dois. Esses ganhos puderam também ser comparados aos obtidos com “scheduling”, o que significou, em primeiro lugar, estabelecer um critério de comparação entre as modelagens.

Consolidados os critérios de comparação, podemos concluir que:

- os dois esquemas apresentam ganhos significativos, quando comparados ao esquema convencional, por redução da MAI.
- os ganhos obtidos com SIC são mais estáveis em relação aos níveis de ruído térmico e potências máximas de transmissão existentes, mantendo-se em torno de dois, para uma faixa de valores em que os ganhos de “scheduling” variam abruptamente, de 1 a 3. Isso se deve ao fato de o “scheduling” requerer níveis elevados de potências instantâneas, o que o inviabiliza para sistemas muito limitados em potências máximas ou sujeitos a ruído térmico muito elevado. Além disso, os próprios controles de potências nos dois casos são de naturezas diferentes, resultando potências maiores no caso “scheduling” do que no SIC.

Podemos concluir que o esquema SIC se adapta melhor para um ambiente povoado predominantemente por usuários de voz e com níveis de potências de transmissão muito limitados. Por outro lado, o esquema “scheduling” resulta ganhos maiores em sistemas pouco limitados em potência, ou quando o ruído térmico pode ser desprezado, face às potências, e na condição de células povoadas predominantemente por usuários de dados.

Uma vez que se tratam de esquemas de naturezas diferentes, podemos considerar a possibilidade de co-existirem, em um mesmo sistema, um esquema de transmissão “scheduling” e um esquema de detecção SIC

(particularmente para $k_2 > 1$), desde que isso seja viável sistemicamente, em função da divisão típica de usuários de cada tipo nas células e dos níveis de potência que se pode utilizar. Sugerimos como trabalhos futuros:

- uma extensão dos estudos realizados nos capítulos de 3 a 6 considerando mais classes de usuários, em conformidade com o que se espera de sistemas de terceira geração;
- uma modelagem de capacidade dinâmica, como comentado no capítulo 2, em que se considera a originação e terminação de chamadas (ou acessos) nos modelos “dual-class” e define-se uma probabilidade de bloqueio para novos usuários como parâmetro do sistema;
- a possibilidade de se considerar “scheduling” no “downlink” e também inter-células, como em [Bors99];
- a possibilidade de outras formas de detecção multi-usuário, diferentes da aqui detalhada, como por exemplo: PIC, lineares e outras descritas nas referências [Mosh96] e [Zvon95];
- a análise de um sistema em que co-existam os esquemas “scheduling” e SIC, como já descrito.

8.**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [Adac98] F. Adashi, M. Sawahashi, H. Suda. *Wideband DS-CDMA for Next Generation Mobile Communications Systems*. IEEE Communications Magazine. Setembro-1998, pp. 56-69.
- [Alme98] C. Almeida, *Cálculo Analítico da Capacidade de Sistemas Celulares CDMA*, Tese de Livre Docência, UNICAMP, Abril-1998.
- [Beau94] N. C. Beaulieu, A. A. Abu-Dayya, P. J. McLane. *Comparison of Methods of Computing Lognormal Sum Distributions and Outages for Digital Wireless Applications*. IEEE VTC'94. Stockholm, Sweden. Junho-1994.

- [Bors99] S. Borst, K. Ramanan, P. Whiting, E. Yeh. *Downlink Scheduling in CDMA Data Networks*. Globecom'99. Rio de Janeiro, Brasil. Dezembro-1999.
- [Dahl98] E. Dahlman, B. Godmundson, M. Nilsson, J. Skold. *UMTS/IMT-2000 Based Wideband CDMA*. IEEE Communications Magazine, vol. 36. Setembro-1998, pp. 70-81.
- [Duel95] A. Duel-Hallen, J. Holtzman, Z. Zvonar. *Multiuser Detection for CDMA Systems*. IEEE Personal Communications. Abril-1995, pp. 46-58.
- [Fent60] L. F. Fenton. *The Sum of Log-Normal Probability Distributions in Scatted Transmission Systems*, IRE Transactions on Communications Systems, Março-1960, pp. 57-67.
- [Fuka96] A. Fukasawa, T. Sato, Y. Takizawa, T. Kato, M. Kawabe, R. Fisher. *Wideband CDMA Systems for Personal Radio Communications*. IEEE Communications Magazine. Outubro-1996, pp. 116-123.
- [Hash98] B. Hashem, E. Sousa. *Performance Evaluation of DS/CDMA Systems Employing Adaptive Transmission Rate under Imperfect Power Control*. PIMRC'98, Boston, USA, 1998.
- [Jesz99] P. J. E. Jeszensky. *Curso Básico sobre Telefonía Móvel Celular*. Projeto Atual-TEC, USP, 1999

- [Kim93] K. I. Kim. *CDMA Cellular Engeneering Issues*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 42, no. 3, Agosto-1993, pp. 345-350.
- [Kish99] S. Kishore, *Scheduling Multirate CDMA Users Based on Average Power Consumption*, Dissertação de Mestrado, WINLAB, Rutgers Univ., Piscataway, NJ, Janeiro-1999
- [Kni98a] D. N. Knisely, S. Kumar, S. Laha, S. Nanda. *Evolution of Wireless Data Services: IS-95 to cdma2000*. IEEE Communications Magazine, Outubro-1998, pp. 140-149.
- [Kni98b] D. N. Knisely, Q. Li, N. Ramesh. *cdma2000: A Third Generation Radio Transmission Technology*. Bell Labs Technical Journal. Julho-Setembro-1998, pp. 63-78.
- [Mori97] N. Morinaga, M. Nakagawa, R. Kohno. *New Concepts and Technologies for Achieving Highly Reliable and High-Capacity Multimedia Wireless Communications Systems*. IEEE Communications Magazine, Janeiro-1997, pp. 34-40.
- [Mosh96] S. Moshavi. *Multi-user Detection for DS-CDMA Communications*. IEEE Communications Magazine. Outubro-1996, pp. 124-136.

- [Ojan98] T. Ojanpera, R. Prasad. *An overview of Air Interface Multiple Access for IMT-2000/UMTS*. IEEE Communications Magazine. Setembro-1998, pp. 82-95.
- [Otto95] T. Ottosson, A. Svensson. *Multirate schemes for multimedia applications in DS/CDMA Systems*. IEEE VTC'95, Chicago, USA. Julho-1995.
- [Papo84] A. Papoulis. *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*. Mc-Graw Hill, Segunda Edição, 1984.
- [Pede96] K. Pedersen, T. E. Kolding, I. Seskar, J. M. Holtzman. *Practical Implementation of Successive Interference Cancellation in DS/CDMA Systems*. Proceedings 1996 5th International Conference on Universal Personal Communications, Outubro-1996.
- [Pate94] P. Patel, J. Holtzman. *Analysis of a Simple Successive Interference Cancellation Scheme in a DS/CDMA System*. IEEE Journal on selected Areas in Communications, vol. 12, no. 5. Junho-1994, pp. 796-807.
- [Ram98a] S. Ramakrishna. *Optimal Scheduling of CDMA Systems*. Tese de Ph. D., WINLAB, Rutgers Univ., Piscataway, NJ, Maio-1998

- [Ram98b] S. Ramakrishna, J. M. Holtzman. *A Scheme for Throughput Maximization in a Dual-Class CDMA System*, IEEE Journal of Selected Areas in Communications, vol. 16, no. 6, Agosto-1998, pp. 830-844.
- [Rape95] J. Rapeli. *UMTS: Targets, System Concept, and Standardization in a Global Framework*. IEEE Personal Communications, Fevereiro-1995, pp. 20-28.
- [Samp95] A. Sampath, P. S. Kumar, J. M. Holtzman. *Power Control and Resource Management for Multimedia CDMA Wireless System*. PIMRC'95, Setembro-1995.
- [Samp97] A. Sampath. *Integrated Voice/Data CDMA Wireless Systems: Capacity, Access Control and Performance Analysis*. Tese de Ph. D., WINLAB, Rutgers Univ., Piscataway, NJ, Outubro-1997
- [Schw82] S. C. Schwartz, Y. S. Yeh. *On the Distribution Function and Moments of Power Sums with Log-Normal Components*. The Bell System Technical Journal, vol. 61, no. 7, Setembro-1982, pp. 1441-1462.
- [Verd86] S. Verdú. *Minimum Probability of Error for Asynchronous Gaussian Multiple-Access Channels*. IEEE Transactions on Information Theory, vol. 32, no. 1. Janeiro-1986, pp. 85-96.

- [Vite93] A. M. Viterbi, A. J. Viterbi. *Erlang Capacity of a Power Controlled CDMA System*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 11, no. 6, Agosto-1993, pp. 892-900.
- [Vite95] A. J. Viterbi. *CDMA: Principles of Spread Spectrum Communications*. Addison- Wesley Publishing Company, 1995.
- [Zvon95] Z. Zvonar, A. Duel-Hallen. *Multuser Detection for CDMA Systems*. IEEE Personal Communications. Abril-1995, pp. 46-58.
- [Warr98] D. Warrier, U. Madhow. *On the Capacity of Cellular CDMA with Controlled Power Disparities*. Proc. 1998 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'98). Ottawa, CA, Maio-1998.
- [Wolf96] S. Wolfram. *The Mathematica Book*. Wolfram Media/ Cambridge University Press, Terceira Edição, 1996.

9.

ANEXOS

Esse item apresenta, primeiramente, as listagens comentadas das rotinas desenvolvidas no “software” *Mathematica for Windows*, para simulação e cálculo dos resultados numéricos dos capítulos.

Em seguida, apresentamos o artigo intitulado “*Comparison of Alternatives for Capacity Increase in Multiple-Rate Dual-Class DS/CDMA Systems*”, gerado a partir dos resultados desse trabalho.

CÁLCULO DAS TAXAS MÁXIMAS PARA SISTEMA IDEAL

Inputs

Número de usuários de voz por célula

$n_1=15$

15

Número de usuários de dados por célula

$n_2=5$

5

Taxa de transmissão dos usuários de voz distribuídos nas células

$r_1=9.6$

9.6

Taxa de transmissão dos usuários de dados em sincronismo

$r_0=1.2$

1.2

E_b/N_0 necessário para usuários de voz

$s_{irv}=5$

5

E_b/N_0 necessário para usuários de dados

$s_{ird}=7.0795$

7.0795

$n_{2max} = \text{Floor}[1 + 1230 / (14.4 * s_{ird}) - n_1 * (1230 / (14.4 * s_{ird}) + 1) / (1230 / (r_1 * s_{irv}) + 1)]$

5

$r_{2a} = 14.4 * (1230 / s_{ird}) * n_{2max} / ((1230 / s_{ird}) * n_2 - 14.4 * (n_{2max} - n_2))$

14.4

$r_{2b} = (1230 / s_{ird}) * (1 - n_1 / (1230 / (r_1 * s_{irv}) + 1)) / (n_2 - 1 + n_1 / (1230 / (r_1 * s_{irv}) + 1))$

16.6234

$p_1 = (.1 * 1.23) / (((1230 / (r_1 * s_{irv}) + 1) * (1 - n_1 / (1230 / (r_1 * s_{irv}) + 1) - n_2 / (1230 / (r_{2a} * s_{ird}) + 1)))$

0.0856643

$p_2 = (.1 * 1.23) / (((1230 / (r_{2a} * s_{ird}) + 1) * (1 - n_1 / (1230 / (r_1 * s_{irv}) + 1) - n_2 / (1230 / (r_{2a} * s_{ird}) + 1)))$

0.174569

$r_{22a} = (r_0 * (1230 / s_{ird} + r_{2a}) + n_2 * (1230 / s_{ird}) * (r_{2a} - r_0)) / ((1230 / s_{ird} + r_{2a}) - n_2 * (r_{2a} - r_0))$

95.7309

$p_{12} = (.1 * 1.23) / (((1230 / (r_1 * s_{irv}) + 1) * (1 - n_1 / (1230 / (r_1 * s_{irv}) + 1) - 1 / (1230 / (r_{22a} * s_{ird}) + 1) - (n_2 - 1) / (1230 / (r_0 * s_{ird}) + 1)))$

0.0856643

$p_{22m} = (1 / n_2) * (.1 * 1.23) / (((1230 / (r_{22a} * s_{ird}) + 1) * (1 - n_1 / (1230 / (r_1 * s_{irv}) + 1) - 1 / (1230 / (r_{22a} * s_{ird}) + 1) - (n_2 - 1) / (1230 / (r_0 * s_{ird}) + 1))) + ((n_2 - 1) / n_2) * (.1 * 1.23) / (((1230 / (r_0 * s_{ird}) + 1) * (1 - n_1 / (1230 / (r_1 * s_{irv}) + 1) - 1 / (1230 / (r_{22a} * s_{ird}) + 1) - (n_2 - 1) / (1230 / (r_0 * s_{ird}) + 1)))$

0.174569

$p_{22i} = (.1 * 1.23) / (((1230 / (r_{22a} * s_{ird}) + 1) * (1 - n_1 / (1230 / (r_1 * s_{irv}) + 1) - 1 / (1230 / (r_{22a} * s_{ird}) + 1) - (n_2 - 1) / (1230 / (r_0 * s_{ird}) + 1)))$

0.810267

$p_{220i} = (.1 * 1.23) / (((1230 / (r_0 * s_{ird}) + 1) * (1 - n_1 / (1230 / (r_1 * s_{irv}) + 1) - 1 / (1230 / (r_{22a} * s_{ird}) + 1) - (n_2 - 1) / (1230 / (r_0 * s_{ird}) + 1)))$

0.0156451

$r_{22b} = \text{Min}[1230., (1230 / s_{ird}) * (1 - n_1 / (1230 / (r_1 * s_{irv}) + 1) - (n_2 - 1) / (1230 / (r_0 * s_{ird}) + 1)) / (n_1 / (1230 / (r_1 * s_{irv}) + 1) + (n_2 - 1) / (1230 / (r_0 * s_{ird}) + 1))]$

120.328

Ocupação das Células

```
oc[r_]:=n1/(1230/(r1*sirv)+1)+n2/(1230/(r*sird)+1)
oc2[r_]:=n1/(1230/(r1*sirv)+1)+(n2-1)/(1230/(r0*sird)+1)+1/(1230/(r*sird)+1)
```

Capacidade máxima

```
cm[r_]:=1.
```

```
cm2[r_]:=1.
```

```
Print["Unscheduled"];Print["n2          max:          ",n2max];Print["ocupação:
",n1/(1230/(r1*sirv)+1)+n2max/(1230/(14.4*sird)+1)];Print[" "];
Print["taxa r2: ",r2b];Print["ocupação: ",oc[r2b]];Print["cap. máxima: ",cm[r2b]];Print[" "];
```

```
Print["taxa  r2  tese:  ",r2a];Print["ocupação:  ",oc[r2a]];Print["cap.  máxima:
",cm[r2a]];Print[" "]
```

Unscheduled

n2 max: 5

ocupação: 0.946072

taxa r2: 16.6234

ocupação: 1.

cap. máxima: 1.

taxa r2 tese: 14.4

ocupação: 0.946072

cap. máxima: 1.

```
Print["Scheduled"];Print["taxa  r22:  ",r22b];Print["ocupação:  ",oc2[r22b]];Print["cap.
máxima: ",cm2[r22b]];
Print["throughput: ",r22b/n2];Print["ganho: ",r22b/(n2*r2b)];
```

```
Print["taxa  r22  tese:  ",r22a];Print["ocupação:  ",oc2[r22a]];Print["cap.  máxima:
",cm2[r22a]];
Print["ganho : ",r22a/(n2*r2a)]
```

Scheduled

taxa r22: 120.328

ocupação: 1.

cap. máxima: 1.

throughput: 24.0655

ganho: 1.44769

taxa r22 tese: 95.7309

ocupação: 0.946072

cap. máxima: 1.

ganho: 1.3296

CÁLCULO DAS TAXAS MÁXIMAS PARA SISTEMA COM CONTROLE IMPERFEITO DE POTÊNCIAS

Cálculo de VAs - Wilkinson

Inputs

Média VA Normal SIR - voz (7 dB):

mzvdb=7.

7.

Média VA Normal SIR - dados (8.5 dB):

mzdadb=8.5

8.5

Desvio VA Normal SIR - voz / dados (0; 0.5; 1.0; 1.5; 2.0 dB):

szdb=1.

1.

Taxa - voz (9.6):

rv=9.6

9.6

Taxa -sincronismo de dados (Rsin=1.2):

rsin=1.2

1.2

rpr=0

0

Número de Usuários de Voz:

nv=15

15

Número de Usuários Transmitindo simultaneamente (1):

k=1

1

Valores Iniciais

Taxa de Dados Scheduled

rs=60.

60.

Taxa Dados Unscheduled - Rmin=14.4

rd=60.

60.

Valores Auxiliares

st1=10.

10.

st2=10.

10.

taxad={0,0,0,0,0,0,0,0,0,0}

{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}

taxas={0,0,0,0,0,0,0,0,0,0}

{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}

ganho={0,0,0,0,0,0,0,0,0,0}

{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}

Funções

mzv=mzvdb*.23026

1.61182

```

mzd=mzddb*.23026
1.95721
sz=szdb.23026
0.23026
ml[q_,r_,s_]:=NIntegrate[(1/(Sqrt[2*3.14159]*sz*(1-x/s)))*Exp[-(Log[(1230/r)*x/(s-x)]-
q)^2/(2*sz^2)],{x,0,s}]
sl[q_,r_,s_,t_]:=NIntegrate[((x-t)^2/(Sqrt[2*3.14159]*sz*(x-(x^2)/s)))*Exp[-
(Log[(1230/r)*x/(s-x)]-q)^2/(2*sz^2)],{x,0,s}]
sigmalog[r_,s_,t_]:=nv*sl[mzv,rv,1,ml[mzv,rv,1]]+(nd-
r)*sl[mzd,s,1,ml[mzd,s,1]]+r*sl[mzd,t,1,ml[mzd,t,1]]+sl[mzd,t,rpr,ml[mzd,t,rpr]]
medialog[r_,s_,t_]:=nv*ml[mzv,rv,1]+(nd-r)*ml[mzd,s,1]+r*ml[mzd,t,1]+ml[mzd,t,rpr]
media[r_,s_]:=Log[s^2/Sqrt[s^2+r]]
sigma[r_,s_]:=Sqrt[Log[(r/s^2)+1]]
occ[r_,s_]:=NIntegrate[(1/(Sqrt[2*3.14159]*r*x))*Exp[-(Log[x]-s)^2/(2*r^2)],{x,0,1}]

```

Cálculo

```

exp1[r_]:=sigma[sigmalog[0,r,r],medialog[0,r,r]]
exp2[r_]:=media[sigmalog[0,r,r],medialog[0,r,r]]
exp1s[r_]:=sigma[sigmalog[1,rsin,r],medialog[1,rsin,r]]
exp2s[r_]:=media[sigmalog[1,rsin,r],medialog[1,rsin,r]]

```

```

For[nd=1,nd<6,nd++,Print["Nd: ",nd];
If[occ[exp1[rd],exp2[rd]]>.99,
Print["Unscheduled"];Print[rd];Print[occ[exp1[rd],exp2[rd]]];
While[occ[exp1[rd],exp2[rd]]>.99,
rd=rd+st1;
Print[rd];Print[occ[exp1[rd],exp2[rd]]];
While[occ[exp1[rd],exp2[rd]]<.99,
rd=rd-st1/10;
Print[rd];Print[occ[exp1[rd],exp2[rd]]];
While[occ[exp1[rd],exp2[rd]]>.99,
rd=rd+st1/100;
Print[rd];Print[occ[exp1[rd],exp2[rd]]],
Print[rd]Print[occ[exp1[rd],exp2[rd]]];
While[occ[exp1[rd],exp2[rd]]<.99,
rd=rd-st1;
Print[rd];Print[occ[exp1[rd],exp2[rd]]];
While[occ[exp1[rd],exp2[rd]]>.99,
rd=rd+st1/10;
Print[rd];Print[occ[exp1[rd],exp2[rd]]];
While[occ[exp1[rd],exp2[rd]]<.99,
rd=rd-st1/100;
Print[rd];Print[occ[exp1[rd],exp2[rd]]];
taxad[[nd]]=rd-.1-(occ[exp1[rd-.1],exp2[rd-.1]]-.99)/((occ[exp1[rd-.1],exp2[rd-.1]]-
occ[exp1[rd],exp2[rd]])/(-.1));
If[occ[exp1s[rs],exp2s[rs]]>.99,
Print["Scheduled"];Print[rs];Print[occ[exp1s[rs],exp2s[rs]]];
While[occ[exp1s[rs],exp2s[rs]]>.99,
rs=rs+st2;
Print[rs];Print[occ[exp1s[rs],exp2s[rs]]];
While[occ[exp1s[rs],exp2s[rs]]<.99,
rs=rs-st2/10;

```

```

Print[rs];Print[occ[exp1s[rs],exp2s[rs]]];
While[occ[exp1s[rs],exp2s[rs]]>.99,
rs=rs+st2/10;
Print[rs];Print[occ[exp1s[rs],exp2s[rs]]],
Print[rs];Print[occ[exp1s[rs],exp2s[rs]]];
While[occ[exp1s[rs],exp2s[rs]]<.99,
rs=rs-st2;
Print[rs];Print[occ[exp1s[rs],exp2s[rs]]];
While[occ[exp1s[rs],exp2s[rs]]>.99,
rs=rs+st2/10;
Print[rs];Print[occ[exp1s[rs],exp2s[rs]]];
While[occ[exp1s[rs],exp2s[rs]]<.99,
rs=rs-st2/100;
Print[rs];Print[occ[exp1s[rs],exp2s[rs]]];
taxas[[nd]]=rs-.1-(occ[exp1s[rs-.1],exp2s[rs-.1]]-.99)/((occ[exp1s[rs-.1],exp2s[rs-.1]]-
occ[exp1s[rs],exp2s[rs]])/(-.1));
ganho[[nd]]=rs/(rd*nd)
ganho
{1., 0.99434, 0.960674, 0.924074, 0.898148, 0, 0, 0, 0, 0}
taxas
{54.2467, 52.7852, 51.3443, 49.9254, 48.5276, 0, 0, 0, 0, 0}
taxad
{54.2467, 26.5996, 17.8671, 13.5117, 10.8996, 0, 0, 0, 0, 0}

```


CÁLCULO DAS TAXAS MÁXIMAS PARA SISTEMA COM CONTROLE IMPERFEITO DE POTÊNCIAS – SEGUNDO MÉTODO

Método de Schwartz & Yeh

Inputs

Média VA Normal SIR - voz (7 dB):

mzvdb=7.

7.

Média VA Normal SIR - dados (8.5 dB):

mzdadb=8.5

8.5

Variância VA Normal SIR - voz / dados (0; 0.5; 1.0; 1.5; 2.0 dB):

szdb=1.

1.

Taxa - voz (9.6):

rv=9.6

9.6

Taxa - dados (Rmin=14.4):

rd=36.

36.

rpr=0

0

Número de Usuários de Voz:

nv=5

5

Número de Usuários de Dados:

nd=3

3

Número de Usuários Transmitindo simultaneamente (1):

k=1

1

Taxa de Transmissão - dados

rs=170.

170.

Taxa Sincronismo - dados (1.2):

rsin=1.2

1.2

mzv=mzvdb*.23026

1.61182

mzd=mzadb*.23026

1.95721

sz=szdb.23026

0.23026

av=1230/rv

128.125

ad=1230/rd

34.1667

ao=1230/rsin

1025.

as=1230/rs

7.23529

Cálculo das VAs - Classe de Usuários Voz

VA Log-Normal SIR = Exp(Z)

NIntegrate[(1/(Sqrt[2*3.14159]*sz))*Exp[-(Log[x]-mzv)^2/(2*sz^2)],{x,0,Infinity}]

5.14657

Sqrt[NIntegrate[((x-%)^2/(Sqrt[2*3.14159]*sz*x))*Exp[-(Log[x]-mzv)^2/(2*sz^2)],{x,0,Infinity}]]

1.20093

VA Log-Normal Lk = 1/R = 1/ (av*1/SIR +1)

NIntegrate[(1/(Sqrt[2*3.14159]*sz*(1-x)))*Exp[-(Log[av*x/(1-x)]-mzv)^2/(2*sz^2)],{x,0,1}]

0.0385396

Sqrt[NIntegrate[((x-%)^2/(Sqrt[2*3.14159]*sz*(x-x^2)))*Exp[-(Log[av*x/(1-x)]-mzv)^2/(2*sz^2)],{x,0,1}]]

0.00861105

Valores em Neper

syv=Sqrt[Log[(% ^2/% ^2)+1]]

0.220718

myv=Log[% ^2/Sqrt[% ^2+% ^2]]

-3.28043

Cálculo das VAs - Classe de Usuários Dados - Unscheduled

VA Log Normal SIR = Exp(Z)

NIntegrate[(1/(Sqrt[2*3.14159]*sz))*Exp[-(Log[x]-mzd)^2/(2*sz^2)],{x,0,Infinity}]

7.26974

Sqrt[NIntegrate[((x-%)^2/(Sqrt[2*3.14159]*sz*x))*Exp[-(Log[x]-mzd)^2/(2*sz^2)],{x,0,Infinity}]]

1.69636

VA Log-Normal Lk = 1/ (ad*1/SIR +1)

NIntegrate[(1/(Sqrt[2*3.14159]*sz*(1-x)))*Exp[-(Log[ad*x/(1-x)]-mzd)^2/(2*sz^2)],{x,0,1}]

0.174093

Sqrt[NIntegrate[((x-%)^2/(Sqrt[2*3.14159]*sz*(x-x^2)))*Exp[-(Log[ad*x/(1-x)]-mzd)^2/(2*sz^2)],{x,0,1}]]

0.0330358

Valores em Neper

syd=Sqrt[Log[(% ^2/% ^2)+1]]

0.188083

myd=Log[% ^2/Sqrt[% ^2+% ^2]]

-1.76585

VA Log-Normal U=RPR*Lk = RPR * 1/(ad*1/SIR+1))

NIntegrate[(1/(Sqrt[2*3.14159]*sz*(1-x/rpr)))*Exp[-(Log[ad*x/(rpr-x)]-mzd)^2/(2*sz^2)],{x,0,rpr}]

0.0348187

Sqrt[NIntegrate[((x-%)^2/(Sqrt[2*3.14159]*sz*(x-(x^2)/rpr)))*Exp[-(Log[ad*x/(rpr-x)]-mzd)^2/(2*sz^2)],{x,0,rpr}]]

0.00660716

Valores em Neper

sp=Sqrt[Log[(% ^2/% ^2)+1]]

0.188083

mp=Log[% ^2/Sqrt[% ^2+% ^2]]

-3.37529

Cálculo de VAs - Classe de Usuários 2 - Scheduled

Sincronismo - VA Log-Normal Lk = 1/R = 1/ (ao*1/SIR +1)

NIntegrate[(1/(Sqrt[2*3.14159]*sz*(1-x)))*Exp[-(Log[ao*x/(1-x)]-mzd)^2/(2*sz^2)],{x,0,1}]

0.00660716

```

0.0070398
Sqrt[NIntegrate[((x-%)^2/(Sqrt[2*3.14159]*sz*(x-x^2)))*Exp[-(Log[ao*x/(1-x)]-
mzd)^2/(2*sz^2)],{x,0,1}]]
0.00162987
Valores em Neper
sydo=Sqrt[Log[(%^2/%^2)+1]]
0.228507
mydo=Log[%^2/Sqrt[%^2+%^2]]
-4.98228
Transmissão - VA Log-Normal Lk = 1/R = 1/ (as*1/SIR +1)
NIntegrate[(1/(Sqrt[2*3.14159]*sz*(1-x)))*Exp[-(Log[as*x/(1-x)]-mzd)^2/(2*sz^2)],{x,0,1}]
0.49463
Sqrt[NIntegrate[((x-%)^2/(Sqrt[2*3.14159]*sz*(x-x^2)))*Exp[-(Log[as*x/(1-x)]-
mzd)^2/(2*sz^2)],{x,0,1}]]
0.0568182
Valores em neper
sydt=Sqrt[Log[(%^2/%^2)+1]]
0.114494
mydt=Log[%^2/Sqrt[%^2+%^2]]
-0.710499
Transmissão Weakest Link - VA Log-Normal U=RPR*Lk = RPR * 1/(as*1/SIR+1))
NIntegrate[(1/(Sqrt[2*3.14159]*sz*(1-x/rpr)))*Exp[-(Log[as*x/(rpr-x)]-
mzd)^2/(2*sz^2)],{x,0,rpr}]
0.0989261
Sqrt[NIntegrate[((x-%)^2/(Sqrt[2*3.14159]*sz*(x-(x^2)/rpr)))*Exp[-(Log[as*x/(rpr-x)]-
mzd)^2/(2*sz^2)],{x,0,rpr}]]
0.0113636
Valores em neper
sps=Sqrt[Log[(%^2/%^2)+1]]
0.114494
mps=Log[%^2/Sqrt[%^2+%^2]]
-2.31994
Cálculo das VAs Somatórios
coef1={{-0.1153239, -5.667912, 11.51279, -7.162489, 1.312986},
{-0.1611385, 20.84215, -44.99768, 27.5621, -5.109783},
{0.1345124, -26.70183, 59.19191, -36.95334, 6.912766},
{0.08057054, 14.29709, -32.25969, 20.55628, -3.88868},
{-0.03145306, -2.730047, 6.244253, -4.048245, 0.7746786}}
{{-0.1153239, -5.667912, 11.51279, -7.162489, 1.312986},

{-0.1611385, 20.84215, -44.99768, 27.5621, -5.109783},

{0.1345124, -26.70183, 59.19191, -36.95334, 6.912766},

{0.08057054, 14.29709, -32.25969, 20.55628, -3.88868},

{-0.03145306, -2.730047, 6.244253, -4.048245, 0.7746786}}
coef2={{4.012876 10^-2, -4.483259, 7.39176, -3.77219 10^1, .5262268},
{-0.1579114 10^1, .1637249 10^2, -.2994901 10^2, .1337812 10^2, -.1747459 10^1},
{.2174588 10^1, -.2114152 10^2, .3976749 10^2, -.177689 10^2, .2195322 10^1},
{-.7525302, .1147157 10^2, -.2189501 10^2, .1006767 10^2, -.1224983 10^1},
{.8447987 10^-1, -.2222839 10^1, .4289557 10^1, -.2035757 10^1, .2499568}}
{{0.0401288, -4.483259, 7.39176, -3.77219, 0.5262268},

```

```

{-1.57911, 16.3725, -29.949, 13.3781, -1.74746},

{2.17459, -21.1415, 39.7675, -17.7689, 2.19532},

{-0.7525302, 11.4716, -21.895, 10.0677, -1.22498},

{0.0844799, -2.22284, 4.28956, -2.03576, 0.2499568}}
coef3={{-3.958699, -5.454983, 1.13928 10^1, -7.116366 10^1, .1315218 10^1},
{.6839918 10^1, .1962529 10^2, -.4314091 10^2, .2647795 10^2, -.4940592 10^1},
{-4.717296 10^1, -.2486802 10^2, .5618572 10^2, -.3501815 10^2, .6560938 10^1},
{.181936 10^1, .1323538 10^2, -.3050022 10^2, .1937757 10^2, -.3658379 10^1},
{-2.817493, -.2518272 10^1, .5893337 10^1, -.3809492 10^1, .7260144}}
{{-3.958699, -5.454983, 11.3928, -7.11637, 1.31522},

{6.83992, 19.6253, -43.1409, 26.4779, -4.94059},

{-4.7173, -24.868, 56.1857, -35.0181, 6.56094},

{1.81936, 13.2354, -30.5002, 19.3776, -3.65838},

{-0.2817493, -2.51827, 5.89334, -3.80949, 0.7260144}}
mw[r_,s_]:=Abs[r-s]
vw[r_,s_]:=Sqrt[r^2 + s^2]
G1[r_,s_]:=10^(Sum[coef1[[j+1,k+1]]*(r^(j/2))*((Abs[s])^(k/2)),{j,0,4},{k,0,4}])
G2[r_,s_]:=10^(Sum[coef2[[j+1,k+1]]*(r^(j/2))*((Abs[s])^(k/2)),{j,0,4},{k,0,4}])
G3[r_,s_]:=10^(Sum[coef3[[j+1,k+1]]*(r^(j/2))*((Abs[s])^(k/2)),{j,0,4},{k,0,4}])
msoma[r_,s_]:=r+s
ro[r_,s_]:=-r/s
sso[r_,s_,t_,u_,v_]:=Sqrt[((r^2)-(t^2)-(2*(s^2)*v)+ u)]
Somatório de Voz
ma1=myv-.0000000001
-3.28043
ma2=myv
-3.28043
sa1=syv
0.220718
sa2=syv
0.220718
msumv=0.
0.
ssumv=0.
0.
For[i=2,i<=(nv),i++,
msumv=msoma[Max[ma1,ma2],G1[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];
ssumv=sso[If[ma1>=ma2,sa1,sa2],ro[If[ma1>=ma2,sa1,sa2],vw[sa1,sa2]],
G1[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]],G2[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]],
G3[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];
verm=mw[ma1,ma2];vers=vw[sa1,sa2];Print[" "];
Print[i," Usuários de Voz"];Print["ma1 ",ma1];Print["ma2 ",ma2];
Print["sa1 ",sa1];Print["sa2 ",sa2];Print["verm dB(<0) ",verm/.23026];
Print["vers dB(>0) ",vers/.23026];Print["ro ",ro[If[ma1>=ma2,sa1,sa2],vw[sa1,sa2]]];
Print["G1 ",G1[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];Print["G2 ",G2[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];

```

```
Print["G3 ",G3[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];Print["msumv",i," ",msumv];Print["ssumv",i,"
",ssumv];
ma1=msumv;sa1=ssumv]
```

2 Usuários de Voz

```
ma1 -3.28043
ma2 -3.28043
sa1 0.220718
sa2 0.220718
-10
verm dB(<0) -4.34292 10
vers dB(>0) 1.35561
ro -0.707107
G1 0.704078
G2 0.517198
G3 0.0478748
msumv2 -2.57635
ssumv2 0.149382
```

3 Usuários de Voz

```
ma1 -2.57635
ma2 -3.28043
sa1 0.149382
sa2 0.220718
verm dB(<0) -3.05775
vers dB(>0) 1.15746
ro -0.560495
G1 0.359493
G2 0.15537
G3 0.020574
msumv3 -2.21686
ssumv3 0.188475
```

4 Usuários de Voz

```
ma1 -2.21686
ma2 -3.28043
sa1 0.188475
sa2 0.220718
verm dB(<0) -4.619
vers dB(>0) 1.26049
ro -0.649376
G1 0.269382
G2 0.08704
G3 0.019167
msumv4 -1.94748
ssumv4 0.183933
```

5 Usuários de Voz

```
ma1 -1.94748
ma2 -3.28043
sa1 0.183933
sa2 0.220718
verm dB(<0) -5.7889
```

```

vers dB(>0) 1.24777
ro -0.640186
G1 0.214726
G2 0.0545379
G3 0.0154684
msumv5 -1.73275
ssumv5 0.171997
msumv=lf[nv>1,msumv,myv]
-1.73275
ssumv=lf[nv>1,ssumv,syv]
0.171997
Somatório de Dados - Unscheduled
ma1=myd-.0000000001
-1.76585
ma2=myd
-1.76585
sa1=syd
0.188083
sa2=syd
0.188083
msumd=0.
0.
ssumd=0.
0.
For[i=1,i<(nd),i++,
msumd=msoma[Max[ma1,ma2],G1[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];
ssumd=sso[lf[ma1>=ma2,sa1,sa2],ro[lf[ma1>=ma2,sa1,sa2],vw[sa1,sa2]],
G1[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]],G2[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]],
G3[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];
verm=mw[ma1,ma2];vers=vw[sa1,sa2];Print[" "];
Print[i+1," Usuários de Dados - Unscheduled"];Print["ma1 ",ma1];Print["ma2 ",ma2];
Print["sa1 ",sa1];Print["sa2 ",sa2];Print["verm dB(<0) ",verm/.23026];
Print["vers dB(>0) ",vers/.23026];Print["ro ",ro[lf[ma1>=ma2,sa1,sa2],vw[sa1,sa2]]];
Print["G1 ",G1[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];Print["G2 ",G2[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];
Print["G3 ",G3[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];Print["msumd",i+1,"
",msumd];Print["ssumd",i+1," ",ssumd];
ma1=msumd;sa1=ssumd]

2 Usuários de Dados - Unscheduled
ma1 -1.76585
ma2 -1.76585
sa1 0.188083
sa2 0.188083
-10
verm dB(<0) -4.34292 10
vers dB(>0) 1.15517
ro -0.707107
G1 0.701737
G2 0.509181
G3 0.0349807
msumd2 -1.06412
ssumd2 0.130926

```

3 Usuários de Dados - Unscheduled

```

ma1 -1.06412
ma2 -1.76585
sa1 0.130926
sa2 0.188083
verm dB(<0) -3.04758
vers dB(>0) 0.995249
ro -0.571317
G1 0.356616
G2 0.151865
G3 0.015325
msumd3 -0.707499
ssumd3 0.178401
msumd=lf[nd>1,msumd,myd]
-0.707499
ssumd=lf[nd>1,ssumd,syd]
0.178401
msut1=0.
0.
ssut1=0.
0.
msut1=msoma[Max[msumv,msumd],G1[vw[ssumv,ssumd],mw[msumv,msumd]]]
-0.427759
ssut1=sso[lf[msumv>=msumd,ssumv,ssumd],ro[lf[msumv>=msumd,ssumv,ssumd],
vw[ssumv,ssumd]],G1[vw[ssumv,ssumd],mw[msumv,msumd]],
G2[vw[ssumv,ssumd],mw[msumv,msumd]],
G3[vw[ssumv,ssumd],mw[msumv,msumd]]]
0.1719
msut2=0.
0.
ssut2=0.
0.
msut2=msoma[Max[msut1,mp],G1[vw[ssut1,sp],mw[msut1,mp]]]
-0.376767
ssut2=sso[lf[msut1>=mp,ssut1,sp],ro[lf[msut1>=mp,ssut1,sp],vw[ssut1,sp]],
G1[vw[ssut1,sp],mw[msut1,mp]],G2[vw[ssut1,sp],mw[msut1,mp]],
G3[vw[ssut1,sp],mw[msut1,mp]]]
0.163793
Somatório de Dados Sincronismo
ma1=mydo-.0000000001
-4.98228
ma2=mydo
-4.98228
sa1=sydo
0.228507
sa2=sydo
0.228507
msumsd=0.
0.
ssumsd=0.
0.
For[i=1,i<(nd-k),i++,
msumsd=msoma[Max[ma1,ma2],G1[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];

```

```

ssumsd=sso[If[ma1>=ma2,sa1,sa2],ro[If[ma1>=ma2,sa1,sa2],vw[sa1,sa2]],
G1[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]],G2[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]],
G3[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];
verm=mw[ma1,ma2];vers=vw[sa1,sa2];Print[" "];
Print[i+1," Usuários de Dados - Sincronismo"];Print["ma1 ",ma1];Print["ma2 ",ma2];
Print["sa1 ",sa1];Print["sa2 ",sa2];Print["verm(<0) ",verm];
Print["vers(>0) ",vers];Print["ro ",ro[If[ma1>=ma2,sa1,sa2],vw[sa1,sa2]]];
Print["G1 ",G1[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];Print["G2 ",G2[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];
Print["G3 ",G3[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];Print["msumsd",i+1,"
",msumsd];Print["ssumsd",i+1," ",ssumsd];
ma1=msumsd;sa1=ssumsd]

```

2 Usuários de Dados - Sincronismo

```

ma1 -4.98228
ma2 -4.98228
sa1 0.228507
sa2 0.228507
-10
verm(<0) -1. 10
vers(>0) 0.323158
ro -0.707107
G1 0.704787
G2 0.519712
G3 0.051281
msumsd2 -4.2775
ssumsd2 0.154665
msumsd=If[nd>1+k,msumsd,If[nd>k,mydo,0]]
-4.2775
ssumsd=If[nd>1+k,ssumsd,If[nd>k,sydo,0]]
0.154665
Usuários de Dados Transmissão
ma1=mydt-.0000000001
-0.710499
ma2=mydt
-0.710499
sa1=sydt
0.114494
sa2=sydt
0.114494
msumdt=0.
0.
ssumdt=0.
0.

```

```

For[i=1,i<(k),i++,
msumdt=msoma[Max[ma1,ma2],G1[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];
ssumdt=sso[If[ma1>=ma2,sa1,sa2],ro[If[ma1>=ma2,sa1,sa2],vw[sa1,sa2]],
G1[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]],G2[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]],
G3[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];
verm=mw[ma1,ma2];vers=vw[sa1,sa2];Print[" "];
Print[i+2," Usuários de Dados - Transmissão"];Print["ma1 ",ma1];Print["ma2 ",ma2];
Print["sa1 ",sa1];Print["sa2 ",sa2];Print["verm(<0) ",verm];
Print["vers(>0) ",vers];Print["ro ",ro[If[ma1>=ma2,sa1,sa2],vw[sa1,sa2]]];
Print["G1 ",G1[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];Print["G2 ",G2[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];

```



```

Print["G3",G3[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];Print["msumdt",i+1,"
",msumdt];Print["ssumdt",i+1," ",ssumdt];
ma1=msumdt;sa1=ssumdt]
msumdt=If[k>1,msumdt,mydt]
-0.710499
ssumdt=If[k>1,ssumdt,sydt]
0.114494
msut1s=0.
0.
ssut1s=0.
0.
msut1s=If[nd>k,msoma[Max[msumdt,msumsd],G1[vw[ssumdt,ssumsd],mw[msumdt,ms
umsd]]],msumdt]
-0.681372
ssut1s=If[nd>k,sso[If[msumdt>=msumsd,ssumdt,ssumsd],ro[If[msumdt>=msumsd,ssu
mdt,ssumsd],
vw[ssumdt,ssumsd]],G1[vw[ssumdt,ssumsd],mw[msumdt,msumsd]],
G2[vw[ssumdt,ssumsd],mw[msumdt,msumsd]],
G3[vw[ssumdt,ssumsd],mw[msumdt,msumsd]]],ssumdt]
0.111649
msut2s=0.
0.
ssut2s=0.
0.
msut2s=msoma[Max[msumv,msut1s],G1[vw[ssumv,ssut1s],mw[msumv,msut1s]]]
-0.40232
ssut2s=sso[If[msumv>=msut1s,ssumv,ssut1s],ro[If[msumv>=msut1s,ssumv,ssut1s],
vw[ssumv,ssut1s]],G1[vw[ssumv,ssut1s],mw[msumv,msut1s]],
G2[vw[ssumv,ssut1s],mw[msumv,msut1s]],
G3[vw[ssumv,ssut1s],mw[msumv,msut1s]]]
0.126281
msut3s=0.
0.
ssut3s=0.
0.
vw[ssut2s,sps]/.23026
0.74028
mw[msut2s,mps]/.23026
-8.32805
G1[vw[ssut2s,sps],mw[msut2s,mps]]
0.147312
G2[vw[ssut2s,sps],mw[msut2s,mps]]
0.0221119
G3[vw[ssut2s,sps],mw[msut2s,mps]]
0.00419362
ro[If[msut2s>=mps,ssut2s,sps],vw[ssut2s,sps]]
-0.740835
msut3s=msoma[Max[msut2s,mps],G1[vw[ssut2s,sps],mw[msut2s,mps]]]
-0.255008
ssut3s=sso[If[msut2s>=mps,ssut2s,sps],ro[If[msut2s>=mps,ssut2s,sps],vw[ssut2s,sps]]
,
G1[vw[ssut2s,sps],mw[msut2s,mps]],G2[vw[ssut2s,sps],mw[msut2s,mps]],
G3[vw[ssut2s,sps],mw[msut2s,mps]]]

```

0.108419

Integrações

$$pc = N \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{2 \cdot 3.14159} \cdot ssut2 \cdot x} \cdot \exp\left[-(\log[x] - msut2)^2 / (2 \cdot ssut2^2)\right] dx$$

0.989284

$$pcsc = N \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{2 \cdot 3.14159} \cdot ssut3s \cdot x} \cdot \exp\left[-(\log[x] - msut3s)^2 / (2 \cdot ssut3s^2)\right] dx$$

0.990665

$$g = (k \cdot rs) / (nd \cdot rd)$$

1.57407

COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS PARA CÁLCULO DA SOMA DE VARIÁVEIS LOG-NORMAIS

Comparação dos Métodos de Schwartz&Yeh e Wilkinson (apresentado em Fenton)

Inputs

Média VA Normal SIR

mzvdb=7.

7.

Desvio VA Normal SIR

szdb=.5

0.5

Taxa

rv=9.6

9.6

Número de Usuários

nv=5

5

mzv=mzvdb*.23026

1.61182

sz=szdb*.23026

0.11513

av=1230/rv

128.125

Cálculo das VAs

VA Log-Normal Lk = $1/R = 1/(av \cdot 1/SIR + 1)$

myvf=NIntegrate[(1/(Sqrt[2*3.14159]*sz*(1-x)))*Exp[-(Log[av*x/(1-x)]-mzv)^2/(2*sz^2)],{x,0,1}]

0.0378673

syvf=NIntegrate[((x-%)^2/(Sqrt[2*3.14159]*sz*(x-x^2)))*Exp[-(Log[av*x/(1-x)]-mzv)^2/(2*sz^2)],{x,0,1}]

General::spell1: Possible spelling error: new symbol name "syvf" is similar to existing symbol "myvf".

0.000017677

Valores da Normal em Neper

syv=Sqrt[Log[(%/%^2)+1]]

0.11069

myv=Log[%/%^2/Sqrt[%/%^2+%%]]

-3.27979

Metodo de Shwartz (resulta desvio e media normal em neper)

coef1={{-0.1153239, -5.667912, 11.51279, -7.162489, 1.312986},
{-0.1611385, 20.84215, -44.99768, 27.5621, -5.109783},
{0.1345124, -26.70183, 59.19191, -36.95334, 6.912766},
{0.08057054, 14.29709, -32.25969, 20.55628, -3.88868},
{-0.03145306, -2.730047, 6.244253, -4.048245, 0.7746786}}

{{-0.1153239, -5.667912, 11.51279, -7.162489, 1.312986},

{-0.1611385, 20.84215, -44.99768, 27.5621, -5.109783},

{0.1345124, -26.70183, 59.19191, -36.95334, 6.912766},

```

{0.08057054, 14.29709, -32.25969, 20.55628, -3.88868},

{-0.03145306, -2.730047, 6.244253, -4.048245, 0.7746786}}
coef2={{4.012876 10^-2, -4.483259, 7.39176, -3.77219 10^1, .5262268},
{-1.579114 10^1, .1637249 10^2, -.2994901 10^2, .1337812 10^2, -.1747459 10^1},
{.2174588 10^1, -.2114152 10^2, .3976749 10^2, -.177689 10^2, .2195322 10^1},
{-.7525302, .1147157 10^2, -.2189501 10^2, .1006767 10^2, -.1224983 10^1},
{.8447987 10^-1, -.2222839 10^1, .4289557 10^1, -.2035757 10^1, .2499568}}
{{0.0401288, -4.483259, 7.39176, -3.77219, 0.5262268},

{-1.57911, 16.3725, -29.949, 13.3781, -1.74746},

{2.17459, -21.1415, 39.7675, -17.7689, 2.19532},

{-0.7525302, 11.4716, -21.895, 10.0677, -1.22498},

{0.0844799, -2.22284, 4.28956, -2.03576, 0.2499568}}
coef3={{-3.958699, -5.454983, 1.13928 10^1, -.7116366 10^1, .1315218 10^1},
{.6839918 10^1, .1962529 10^2, -.4314091 10^2, .2647795 10^2, -.4940592 10^1},
{-.4717296 10^1, -.2486802 10^2, .5618572 10^2, -.3501815 10^2, .6560938 10^1},
{.181936 10^1, .1323538 10^2, -.3050022 10^2, .1937757 10^2, -.3658379 10^1},
{-.2817493, -.2518272 10^1, .5893337 10^1, -.3809492 10^1, .7260144}}
{{-3.958699, -5.454983, 11.3928, -7.11637, 1.31522},

{6.83992, 19.6253, -43.1409, 26.4779, -4.94059},

{-4.7173, -24.868, 56.1857, -35.0181, 6.56094},

{1.81936, 13.2354, -30.5002, 19.3776, -3.65838},

{-0.2817493, -2.51827, 5.89334, -3.80949, 0.7260144}}
mw[r_,s_]:=Abs[r-s]
vw[r_,s_]:=Sqrt[r^2 + s^2]
G1[r_,s_]:=10^(Sum[coef1[[j+1,k+1]]*(r^(j/2))*((Abs[s])^(k/2)),{j,0,4},{k,0,4}])
G2[r_,s_]:=10^(Sum[coef2[[j+1,k+1]]*(r^(j/2))*((Abs[s])^(k/2)),{j,0,4},{k,0,4}])
G3[r_,s_]:=10^(Sum[coef3[[j+1,k+1]]*(r^(j/2))*((Abs[s])^(k/2)),{j,0,4},{k,0,4}])
msoma[r_,s_]:=r+s
ro[r_,s_]:=-r/s
sso[r_,s_,t_,u_,v_]:=Sqrt[((r^2)-(t^2)-(2*(s^2)*v)+ u)]
ma1=myv-.0000000001
-3.27979
ma2=myv
-3.27979
sa1=syv
0.11069
sa2=syv
0.11069
msumv=0.
0.
ssumv=0.
0.
For[i=2,i<=(nv),i++,
msumv=msoma[Max[ma1,ma2],G1[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];

```

```

ssumv=sso[lf[ma1>=ma2,sa1,sa2],ro[lf[ma1>=ma2,sa1,sa2],vw[sa1,sa2]],
G1[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]],G2[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]],
G3[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];
verm=mw[ma1,ma2];vers=vw[sa1,sa2];Print[" "];
Print[i," Usuários de Voz"];Print["ma1 ",ma1];Print["ma2 ",ma2];
Print["sa1 ",sa1];Print["sa2 ",sa2];Print["verm dB(<0) ",verm/.23026];
Print["vers dB(>0) ",vers/.23026];Print["ro ",ro[lf[ma1>=ma2,sa1,sa2],vw[sa1,sa2]]];
Print["G1 ",G1[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];Print["G2 ",G2[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];
Print["G3 ",G3[vw[sa1,sa2],mw[ma1,ma2]]];Print["msumv",i," ",msumv];Print["ssumv",i,"
",ssumv];

```

```

ma1=msumv;sa1=ssumv]

```

2 Usuários de Voz

ma1 -3.27979

ma2 -3.27979

sa1 0.11069

sa2 0.11069

-10

verm dB(<0) -4.34292 10

vers dB(>0) 0.679837

ro -0.707107

G1 0.701762

G2 0.514299

G3 0.013027

msumv2 -2.57803

ssumv2 0.145103

3 Usuários de Voz

ma1 -2.57803

ma2 -3.27979

sa1 0.145103

sa2 0.11069

verm dB(<0) -3.04769

vers dB(>0) 0.792594

ro -0.795075

G1 0.353637

G2 0.1488

G3 0.0099854

msumv3 -2.22439

ssumv3 0.179362

4 Usuários de Voz

ma1 -2.22439

ma2 -3.27979

sa1 0.179362

sa2 0.11069

verm dB(<0) -4.58351

vers dB(>0) 0.915347

ro -0.850994

G1 0.277338

G2 0.0867327

G3 0.0107427

msumv4 -1.94706

ssumv4 0.162565

```

5 Usuários de Voz
ma1 -1.94706
ma2 -3.27979
sa1 0.162565
sa2 0.11069
verm dB(<0) -5.78797
vers dB(>0) 0.854128
ro -0.826582
G1 0.227836
G2 0.0558735
G3 0.00801737
msumv5 -1.71922
ssumv5 0.139413
msumv=lf[nv>1,msumv,myv]
-1.71922
ssumv=lf[nv>1,ssumv,syv]
0.139413
Metodo de Fenton (resulta desvio e media normal em neper)
For[i=2,i<=nv,i++,
Print["msumv",i,Log[(i*myvf)^2/Sqrt[(i*myvf)^2+i*syvf]]];
Print["ssumv",i,Sqrt[Log[i*syvf/(i*myvf)^2+1]]]]
msumv2-2.58359
ssumv20.0783894
msumv3-2.1771
ssumv30.0640374
msumv4-1.88891
ssumv40.0554723
msumv5-1.66546
ssumv50.0496235

```

SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

```
<<C:\WNMATH22\PACKAGES\STATISTI\CONTINUO.M
<<C:\WNMATH22\PACKAGES\GRAPHICS\GRAPHICS.M
```

SIR de Voz - Média e desvio em dB

```
msirdb=7
```

```
7
```

```
ssirdb=9.
```

```
9.
```

Parâmetros de Simulação

Número de Amostras

```
n=1000
```

```
1000
```

Número de Termos

```
k=5
```

```
5
```

Número de Repetições

```
r=1
```

```
1
```

Variável SIR (entra o desvio e não a variância)

```
sir=LogNormalDistribution[msirdb*.23026,ssirdb*.23026]
```

```
LogNormalDistribution[1.61182, 2.07234]
```

Média e Variância Lineares de SIR

```
Mean[sir]
```

```
42.91049942366701
```

```
Variance[sir]
```

```
133131.1645057421
```

R Repetições do Cálculo da soma de K VAs L, através de N amostras de cada

```
For[i=1,i<=r,i++,
```

```
kldata=N[Table[Sum[1/(1230/(9.6*Random[sir])+1),{i,k}],{n}]];
```

```
Print["# Termos= ",k];sl=Sqrt[Log[Variance[kldata]/Mean[kldata]^2+1]];
```

```
Print["desvio-normal_",i," ": ",sl];
```

```
ml=Log[Mean[kldata]^2/Sqrt[Mean[kldata]^2+Variance[kldata]]];
```

```
Print["media-normal_",i," ": ",ml]]
```

```
# Termos= 5
```

```
desvio-normal_1: 0.623131
```

```
media-normal_1: -0.748708
```

```
freq=BinCounts[kldata,{Min[kldata],Max[kldata],(Max[kldata]-Min[kldata])/30}]
```

```
{13, 18, 24, 26, 26, 28, 16, 13, 9, 9, 15, 7, 9, 14, 11, 12, 9, 12, 5, 1, 6, 3, 1, 3, 1, 3,
```

```
4, 0, 0, 1}
```

```
midpoints=Table[Min[kldata]+(Max[kldata]-Min[kldata])/60+((Max[kldata]-
```

```
Min[kldata])/30)*(x-1),{x,Count[freq,_]}]
```

```
{0.0616787, 0.122168, 0.182657, 0.243146, 0.303636, 0.364125, 0.424614, 0.485103,
0.545592,
```

0.606082, 0.666571, 0.72706, 0.787549, 0.848039, 0.908528, 0.969017, 1.02951,
1.09,

1.15048, 1.21097, 1.27146, 1.33195, 1.39244, 1.45293, 1.51342, 1.57391, 1.6344,
1.69489,

1.75538, 1.81587}

BarChart[Transpose[{N[freq/n],midpoints}]]

-Graphics-

Plot[PDF[LogNormalDistribution[m1,s1],x],{x,0.000001,2}]

-Graphics-

CÁLCULO DAS TAXAS MÁXIMAS PARA SISTEMA MULTI-CELULAR E POTÊNCIAS LIMITADAS

Inputs

Número de usuários de voz por célula

$n_1=8$

8

Número de usuários de dados por célula

$n_2=5$

5

Taxa de transmissão dos usuários de voz distribuídos nas células

$r_1=9.6$

9.6

Taxa de transmissão dos usuários de dados em sincronismo

$r_0=1.2$

1.2

E_b/N_0 necessário para usuários de voz

$sir_v=5$

5

E_b/N_0 necessário para usuários de dados

$sir_d=7.0795$

7.0795

Cálculo de r_2 e t usando WLRPR2

WLRPR2

$wlrpr_2=0 \cdot .76 \cdot 123 / (.35 \cdot .3)$

0

$u_1=.76 \cdot n_1 / (1230 / (r_1 \cdot sir_v) + 1)$

0.459531

$r_2 = (1230 / sir_d) \cdot (.76 \cdot n_1 / (1230 / (r_1 \cdot sir_v) + 1)) / (n_2 + wlrpr_2 + n_1 / (1230 / (r_1 \cdot sir_v) + 1) - .76)$

17.5839

$t = (1/n_2) \cdot r_2 \cdot r_0 \cdot (.76 \cdot n_1 / (1230 / (r_1 \cdot sir_v) + 1) - (n_2 - 1) / (1230 / (r_0 \cdot sir_d) + 1)) / (r_0 \cdot (.76 \cdot n_1 / (1230 / (r_1 \cdot sir_v) + 1)) - r_2 \cdot (n_2 - 1) / (1230 / (r_0 \cdot sir_d) + 1))$

26.4382

t/r_2

1.50354

$r_{0up1} = (1230 / sir_d) \cdot (n_2 / (1230 / (r_2 \cdot sir_d)) - u_1) / (n_2 + u_1)$

1.48005

$u_2 = u_1 - n_2 \cdot (1 + u_1) / (u_1 \cdot 1230 / (r_0 \cdot sir_d) + 1)$

0.35147

$r_{0up2} = (1230 / sir_d) \cdot (u_1^2) / (n_2 + u_1 \cdot (n_2 - 1) - u_1^2)$

5.53627

$1230 / (r_2 \cdot sir_d \cdot (1.32 \cdot n_2 - 1)) + 1 / ((1.32 \cdot n_2 - 1) - 1.32 \cdot n_2 / (1.32 \cdot n_2 - 1))$

0.764405

CÁLCULO DAS TAXAS MÁXIMAS COM POTÊNCIAS E DISTÂNCIAS LIMITADAS

Inputs

Caso das Potências e Distâncias Restritas

Número de usuários de voz por célula

$n_1=13$

13

Número de usuários de dados por célula

$n_2=4$

4

Taxa de transmissão dos usuários de voz distribuídos nas células

$r_1=9.6$

9.6

$r_{2min}=20$

20

Taxa de transmissão dos usuários de dados em sincronismo

$r_0=1.2$

1.2

E_b/N_0 necessário para usuários de voz

$sir_v=5$

5

E_b/N_0 necessário para usuários de dados

$sir_d=7.0795$

7.0795

Cálculo de r_2 e t usando WLRPR2

WLRPR2

$wlrpr_2=.1*1.23/(1.5*.7)$

0.117143

$r_2=(1230/sir_d)*(1-1.32*n_1/(1230/(r_1*sir_v)+1)-$
 $.78*0.36*n_2/(1230/(r_{2min}*sir_d)+1))/(1.1*0.64*n_2+wlrpr_2-$
 $1+1.32*n_1/(1230/(r_1*sir_v)+1)+.78*0.36*n_2/(1230/(r_{2min}*sir_d)+1))$
 15.451

$t=(.64/(.64*n_2))*r_0*r_2*(1-1.32*n_1/(1230/(r_1*sir_v)+1)-.78*0.36*n_2/(1230/(r_{2min}*sir_d)+1)-$
 $1.1*.64*(n_2-1)/(1230/(r_0*sir_d)+1))/(r_0*(1-1.32*n_1/(1230/(r_1*sir_v)+1)-$
 $.78*0.36*n_2/(1230/(r_{2min}*sir_d)+1))-r_2*(1.10*.64*(n_2-1)/(1230/(r_0*sir_d)+1)))$
 16.3994

t/r_2

1.06138

CÁLCULO DAS TAXAS MÁXIMAS COMPARANDO-SE LIMITES DE CAPACIDADE

Cálculo dos ganhos com Scheduling para valores de noW/ph obtidos com modelagem de limite n

Inputs

Número de usuários de voz por célula

$n_1=8$

8

Número de usuários de dados por célula

$n_2=5$

5

Taxa de transmissão dos usuários de voz distribuídos nas células

$r_1=9.6$

9.6

Taxa de transmissão dos usuários de dados em sincronismo

$r_0=1.2$

1.2

E_b/N_0 necessário para usuários de voz

$s_{irv}=5$

5

E_b/N_0 necessário para usuários de dados

$s_{ird}=7.0795$

7.0795

Cálculo de r_2 e t usando WLRPR2

WLRPR2

$w_{lrpr2}=0.194$

0.194

$u_1=.76-n_1/(1230/(r_1*s_{irv})+1)$

0.459531

$r_2=(1230/s_{ird})*(.76-n_1/(1230/(r_1*s_{irv})+1))/(n_2+w_{lrpr2}+n_1/(1230/(r_1*s_{irv})+1)-.76)$

16.8634

$t=(1/n_2)*r_2*r_0*(.76-n_1/(1230/(r_1*s_{irv})+1)-(n_2-1)/(1230/(r_0*s_{ird})+1))/(r_0*(.76-n_1/(1230/(r_1*s_{irv})+1))-r_2*(n_2-1)/(1230/(r_0*s_{ird})+1))$

19.7064

t/r_2

1.16859

$r_{0up1}=(1230/s_{ird})*(n_2/(1230/(r_2*s_{ird}))-u_1)/(n_2+u_1)$

0.820172

$u_2=u_1-n_2*(1+u_1)/(u_1*1230/(r_0*s_{ird})+1)$

0.35147

$r_{0up2}=(1230/s_{ird})*(u_1^2)/(n_2+u_1*(n_2-1)-u_1^2)$

5.53627

CÁLCULO DAS TAXAS MÁXIMAS COM SIC – CLASSE ÚNICA

Cálculo das Capacidades com SIC e Detecção Convencional e Classe Única

Raio da Célula

 $r=1$

1

Número de Usuários com SIC

n1=22

22

Número de usuários para detecção convencional

$n_2=14$

14

Qualidade de Serviço dos usuários em modo SIC

$$g_1 = 5 \cdot 9.6 / 1230$$

0.0390244

Qualidade de Serviço dos usuários em modo convencional

$$g_2 = 5 \cdot 9.6 / 1230$$

0.0390244

Relação Ruído / Interferência Total

 $f=0.3$

0.3

Distância entre rádio bases, em relação ao raio, primeiro anel

 $d=2$

2

Interferência externa gerada por uma célula à distância $d=2$ (primeiro anel)

$$(g1^n n! / (3.14159^r r^2)) * N \text{Integrate}[(g1^*(1 - x^2/r^2) + 1)^{(n-1)} * (x^5)^* 1 / ((x^2 + d^2 - 2*x*d*\text{Cos}[t])^2), \{x, 0, r\}, \{t, 0, 2*3.14159\}]$$

0.0488217

Interferência externa gerada no primeiro anel

6*0%

0.29293

Distância entre rádio bases, em relação ao raio, segundo anel

d=4

4

Interferência externa gerada por uma célula do segundo anel

$$(g1^n n! / (3.14159 \cdot r^2)) \cdot N \text{Integrate}[(g1 \cdot (1 - x^2/r^2) + 1)^{n-1}) \cdot (x^2)^5 / ((x^2 + d^2 - 2 \cdot x \cdot d \cdot \cos[t])^2), \{x, 0, r\}, \{t, 0, 2 \cdot 3.14159\}]$$

0.00166639

Interferência externa gerada no segundo anel

12*0%

0.0199967

Interferência externa total dos dois anéis

 $d=6$

6

$$(g1^n n! / (3.14159 \cdot r^2)) \cdot N \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} ((g1 \cdot (1 - x^2/r^2) + 1)^{n-1}) \cdot (x^5)^* 1 / ((x^2 + d^2 - 2 \cdot x \cdot d \cdot \cos[t])^2) \cdot \{x, 0, r\}, \{t, 0, 2\pi \cdot 3.14159\}$$

0.000297048

18*%

0.00534687

0%+0%0%0%0%+0%0%0%0%0%0%

CÁLCULO DAS TAXAS MÁXIMAS COM SIC – DUAL CLASS

Cálculo da Capacidade com SIC e Dual Classe

Raio da Célula

$r=1$

1

Número de Usuários de classe 1

$n1=8$

8

Número de usuários de classe 2

$n2=5$

5

Qualidade de Serviço dos usuários de classe 1

$g1=.04$

0.04

Qualidade de Serviço dos usuários de classe 2 no modo SIC

$g21=.32$

0.32

Qualidade de Serviço dos usuários de classe 2 no modo convencional

$g22=.32/2.8$

0.114286

Relação Ruído / Interferência Total- Eta

$f=0.0$

0

Distância entre rádio bases, em relação ao raio, primeiro anel

$d=2$

2

Interferência externa gerada pelos usuários de Classe 2 de uma célula à distância $d=2$ (primeiro anel)

$(g21*n2*(g1+1)^{n1}/(3.14159*r^2))*N\text{Integrate}[(g21*(1-x^2/r^2)+1)^{(n2-1)}*(x^5)/((x^2+d^2-2*x*d*\text{Cos}[t])^2),\{x,0,r\},\{t,0,2*3.14159\}]$

0.137124

Interferência externa gerada pelos usuários de Classe 1 de uma célula à distância $d=2$ (primeiro anel)

$(g1*n1/(3.14159*r^2))*N\text{Integrate}[(g1*(1-x^2/r^2)+1)^{(n1-1)}*(x^5)/((x^2+d^2-2*x*d*\text{Cos}[t])^2),\{x,0,r\},\{t,0,2*3.14159\}]$

0.0160927

Interferência externa gerada no primeiro anel

$6*(\%+\%)\%$

0.919302

Distância entre rádio bases, em relação ao raio, segundo anel

$d=4$

4

Interferência externa gerada pelos usuários de Classe 2 de uma célula à distância $d=2$ (primeiro anel)

$(g21*n2*(g1+1)^{n1}/(3.14159*r^2))*N\text{Integrate}[(g21*(1-x^2/r^2)+1)^{(n2-1)}*(x^5)/((x^2+d^2-2*x*d*\text{Cos}[t])^2),\{x,0,r\},\{t,0,2*3.14159\}]$

0.0047359

Interferência externa gerada pelos usuários de Classe 1 de uma célula à distância $d=2$ (primeiro anel)

$(g1*n1/(3.14159*r^2))*N\text{Integrate}[(g1*(1-x^2/r^2)+1)^{(n1-1)}*(x^5)/((x^2+d^2-2*x*d*\text{Cos}[t])^2),\{x,0,r\},\{t,0,2*3.14159\}]$

0.000540098

Interferência externa gerada no segundo anel

$$12 * (\% + \% \%)$$

0.063312

Distância entre rádio bases em relação ao raio, terceiro anel

$$d=6$$

6

Interferência externa gerada pelos usuários de Classe 2 de uma célula à distância $d=2$ (primeiro anel)

$$(g_{21} * n_2 * (g_1 + 1)^{n_1} / (3.14159 * r^2)) * N \int_0^{2\pi} \int_0^r ((g_1 * (1 - x^2 / r^2) + 1)^{n_2 - 1} * (x^5) / ((x^2 + d^2 - 2 * x * d * \cos[t])^2)) * \{x, 0, r\}, \{t, 0, 2 * 3.14159\}$$

0.000845978

Interferência externa gerada pelos usuários de Classe 1 de uma célula à distância $d=2$ (primeiro anel)

$$(g_1 * n_1 / (3.14159 * r^2)) * N \int_0^{2\pi} \int_0^r ((g_1 * (1 - x^2 / r^2) + 1)^{n_1 - 1} * (x^5) / ((x^2 + d^2 - 2 * x * d * \cos[t])^2)) * \{x, 0, r\}, \{t, 0, 2 * 3.14159\}$$

0.0000959851

Interferência externa gerada no terceiro anel

$$18 * (\% + \% \%)$$

0.0169553

Interferência externa total gerada

$$\% + \% \% \% \% \% + \% \% \% \% \% \% \% \% \%$$

0.99957

Limitação de capacidade (considerando interferência interna já na limitação)

$$1 - ((g_1 + 1)^{n_1} * (g_{21} + 1)^{n_2 - 1}) * f$$

1.

Modo Convencional

$$d=2$$

2

$$(g_1 * n_1 / (3.14159 * r^2)) * N \int_0^{2\pi} \int_0^r ((x^5) * 1 / ((x^2 + d^2 - 2 * x * d * \cos[t])^2)) * \{x, 0, r\}, \{t, 0, 2 * 3.14159\} + (g_{22} * n_2 / (3.14159 * r^2)) * N \int_0^{2\pi} \int_0^r ((x^5) * 1 / ((x^2 + d^2 - 2 * x * d * \cos[t])^2)) * \{x, 0, r\}, \{t, 0, 2 * 3.14159\}$$

0.0422158

$$6 * \%$$

0.253295

$$d=4$$

4

$$(g_1 * n_1 / (3.14159 * r^2)) * N \int_0^{2\pi} \int_0^r ((x^5) * 1 / ((x^2 + d^2 - 2 * x * d * \cos[t])^2)) * \{x, 0, r\}, \{t, 0, 2 * 3.14159\} + (g_{22} * n_2 / (3.14159 * r^2)) * N \int_0^{2\pi} \int_0^r ((x^5) * 1 / ((x^2 + d^2 - 2 * x * d * \cos[t])^2)) * \{x, 0, r\}, \{t, 0, 2 * 3.14159\}$$

0.0014053

$$12 * \%$$

0.0168636

Interferência externa total considerando dois anéis, caso convencional

$$d=6$$

6

$$(g_1 * n_1 / (3.14159 * r^2)) * N \int_0^{2\pi} \int_0^r ((x^5) * 1 / ((x^2 + d^2 - 2 * x * d * \cos[t])^2)) * \{x, 0, r\}, \{t, 0, 2 * 3.14159\} + (g_{22} * n_2 / (3.14159 * r^2)) * N \int_0^{2\pi} \int_0^r ((x^5) * 1 / ((x^2 + d^2 - 2 * x * d * \cos[t])^2)) * \{x, 0, r\}, \{t, 0, 2 * 3.14159\}$$

0.000249379

$$18 * \%$$

0.00448883

$$\% + \% \% \% \% \% + \% \% \% \% \% \% \%$$

0.274647

Interferência total, incluindo a interna, no caso convencional

$(n_1) \cdot g_1 + (n_2 - 1) \cdot g_{22} + \%$

1.05179

$\% / (n_2 \cdot g_{22} + n_1 \cdot g_1)$

0.308098

Limitação de capacidade no caso convencional

1-f

1.

g_{21}/g_{22}

2.8

Comparison of Alternatives for Capacity Increase in Multiple-Rate Dual-Class DS/CDMA Systems

Cyro Scarano Hemsí and Paul Jean Etienne Jeszensky
Department of Telecommunications and Control Engineering
Escola Politécnica of University of São Paulo
P. O. Box 61548, São Paulo, Brazil

Tel. 5511-818-5290, fax: 5511-818-5718; e-mail: cyro.hemsi@promon.com.br, pjj@lcs.poli.usp.br

ABSTRACT: Initially this work presents and compares the capacities of multi-cell and power constrained DS/CDMA systems, in the single-class case (voice) with conventional and SIC (successive interference cancellation) detection schemes, determining the maximum number of users for both modes. Next, modelling and results proposed in the literature are extended for multi-cell dual-class systems (voice and data services), comparing the maximum data rates (or data throughputs) obtained with conventional, SIC and scheduling schemes, for some user configurations.

1- Introduction

Third generation mobile communications systems, particularly, DS/CDMA access interface, will be required to support not only speech, but also variable data rate transmission (images, e-mail, file transfer, Internet and corporate network access), video and multimedia services, [1] and [2]. To provide this, they should optimise their capacities and support users with different rates, quality of service, delay and power requirements, [3].

Emerging multi-user detection schemes allow mitigation of the near-far effect and to obtain substantial capacity gains (as will be presented in following sections), [4] and [5]. In this work, particularly, successive interference cancellation (SIC) is analysed due to its simplicity to estimate the received powers directly from the conventional linear correlators' outputs.

The capacity model proposed in [3], for the up-link of a conventional system with variable processing gain, will be extended for the multi-cell case and its capacity for some configurations will be compared in terms of maximum number of users and maximum data rates. This comparison will be done with the capacities achieved by the same system utilising different detection or transmission schemes, namely, SIC and scheduling (the former system will be referred to as "conventional", in opposition to these two modes). SIC systems capacity modelling was presented in [6] and will also be extended for the multi-cell case. The scheduling scheme that will be analysed was proposed in [7].

Although SIC is a multi-user detection option and scheduling is a different way to transmit data, both can offer capacity gains when compared with conventional systems (which means single user detection with simultaneous transmission by all users), due to reductions in the MAI (multi-access

or internal interference). These gains will be compared in this work.

Initially, modelling and results will be presented for a single class case (voice only), next, multi-class, particularly, voice and data (dual class) case will be analysed.

2- Single Class (Voice) Modelling

2.1- Conventional Scheme

As presented in [3], the expression for bit energy (E_b) per total interference power spectral density (I_0), considering perfect power control (that means constant received powers $h_i P_i = hP$), is given by:

$$\frac{E_b}{I_0} = \gamma_1 = \frac{W}{R_1} \times \frac{hP}{(N-1)hP + (\eta_0 + I_E)W} \quad (1)$$

In this expression, P_i is the transmission power and h_i is the path loss (*a priori* known) of the i^{th} user, W is the bandwidth, γ_1 and R_1 are rate and QoS (quality of service) requirements for voice, which should be satisfied with equality, N is the number of users in the cell, η_0 and I_E are, respectively, thermal noise and external interference power spectral densities.

For the multi-cell case, given a user configuration in the cell and using the development presented in [8], the normalised cell capacity is given by:

$$\frac{N}{\frac{W}{R_1 \gamma_1} + 1} = \frac{1}{1+f} \left\{ 1 - \eta_0 W / \left[\left(\frac{W}{R_1 \cdot \gamma_1} + 1 \right) hP \right] \right\} \leq \frac{1}{1+f} \left\{ 1 - \eta_0 W / \min_i \left\{ \left(\frac{W}{R_1 \cdot \gamma_1} + 1 \right) p h_i \right\} \right\} \quad (2)$$

where f corresponds to the external (multi-cell) interference impact on cell capacity, as will be detailed next; p is the maximum transmission power constraint for the class and this solution was obtained by taking γ_1 and R_1 equal to their minimum specified values, as mentioned, corresponding to a minimum total power solution, [3].

When the number of users reaches a maximum, the powers will be the maximum allowed ones, but still restricted to the maximum power constraints for all users- particularly for the most distant user from the cell-site (which corresponds to the

minimum $\left(\frac{W}{R_1 \gamma_1} + 1\right) p h_i$ term).

Using [8] and evaluating the external interference, it follows:

$$f = \frac{I_E \cdot W}{N \cdot h \cdot P} =$$

$$\frac{1}{\pi \cdot R^2} \int_0^R r^5 dr \sum_{i=1}^{\infty} 6ig(r, 2iR) \approx 0.33 \quad (3)$$

$$\text{with: } g(r, d) = \int_0^{2\pi} d\theta / [d^2 + r^2 - 2rd \cos(\theta)]^2$$

assuming unity voice activity, propagation losses proportional to the fourth power of distances and homogeneous multi-cell system (identical populations on the cells).

So, the cell capacity, in a multi-cell environment, is reduced to approximately 75% of that corresponding to an isolated cell, due to external interference.

If, furthermore, the capacity is also limited by the total maximum interference level per thermal noise ratio, as described in [9], for the perfect power control case, we can write:

$$\frac{I_0 W}{\eta_0 W} = \frac{P_{MAI} + (I_E + \eta_0)W}{\eta_0 W} =$$

$$\frac{(N-1)hP + (I_E + \eta_0)W}{\eta_0 W} \leq \frac{1}{\eta} \quad (4)$$

where P_{MAI} is the total internal (multi-access) interference and η is the cell outage factor, resulting:

$$\frac{N}{\frac{W}{R_1 \gamma_1} + 1} \leq \frac{1}{1+f} \left\{ 1 - \eta / \left[\left(\frac{W}{R_1 \gamma_1} + 1 \right) \frac{\gamma_1}{W/R_1} \right] \right\} \quad (5)$$

Using (2), it follows:

$$\frac{\eta_0 W}{p \min(h_i)} = \frac{\eta}{\gamma_1} (W/R_1) \quad (6)$$

the condition for both capacity limits having the same value.

2.2- SIC Scheme

SIC scheme results in system capacity increase by MAI reduction, performed by successively detecting and cancelling interference from users with stronger powers. It is assumed, in a single class environment, that the received power levels depend only on the users' distances related to the cell-site, neglecting shadowing effects, which means that the users can be ordered, in terms of power, solely by their distances (locations).

Given N users in a cell of radius R , the location probability density of the i^{th} nearest user to the cell-site (i^{th} strongest power) to be in a distance r' , inside an interval $(r, r+dr)$ from the cell-site is:

$$f_i(r) = \frac{P_i(r \leq r' \leq r+dr)}{dr} =$$

$$\binom{N}{i} \left(\frac{r^2}{R^2} \right)^{i-1} \frac{2r}{R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^{N-i} \quad (7)$$

This result could be obtained from order statistics of uniform variables, as proposed in [5].

The users' received powers for SIC are disparate and ordered by a control power as follow, [6]:

$$h_i \cdot P_i = \gamma'_1 \cdot (\gamma'_1 + 1)^{N-i} \cdot P_0 \quad (8)$$

where $\gamma'_1 = \frac{\gamma_1}{W/R_1}$ and the power control assures

$E_b/I_0 = \gamma_1$ for all users, with γ_1 and R_1 the class requirements, as specified. P_0 is given by:

$$P_0 = (I_E + \eta_0)W = \sum_{\text{other cells}} \sum_{i=1}^N \iint h_i P_i \frac{r^4}{x^4} f_i(\theta) f_i(r) d\theta dr +$$

$$\eta_0 W = \quad (9)$$

$$= \sum_{\text{other cells}} \int_0^R P_0 \frac{\gamma_1 r^5 N}{\pi R^2} g(r, d) \left[\gamma_1 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + 1 \right]^{N-1} dr + \eta_0 W$$

where $f_i(\theta)=1/2\pi$ (meaning a uniform probability density of users in θ) and assuming, again, propagation losses proportional to the fourth power of distances.

Comparing with results of the previous section, it follows: $\frac{I_E W}{(\gamma'_1 + 1)^N P_0} = f$, where f is the capacity reduction factor, due to multi-cell environment, as already presented.

For the worst case multi-access interference (which means the nearest user from the cell-site) the maximum relative total interference bound, as in (4), results:

$$\frac{P_{MAI,1} + P_0}{\eta_0 W} = \frac{(\gamma'_1 + 1)^{N-1} P_0}{\eta_0 W} \leq \frac{1}{\eta} \quad (10)$$

Similarly to (5), the SIC capacity expression is given by:

$$\sum_{\text{other cells}} \int_0^R \frac{\gamma'_1 r^5 N}{\pi R^2} g(r, d) \left[\gamma'_1 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + 1 \right]^{N-1} dr \leq 1 - (\gamma'_1 + 1)^{N-1} \eta \quad (11)$$

2.3- Single Class Numerical Results

In (5) and (11), varying η from zero to 0.3 (η can be relaxed, since it corresponds to a soft blocking limitation, as described in [9]), the following maximum numbers of voice users can be obtained with conventional and SIC schemes.

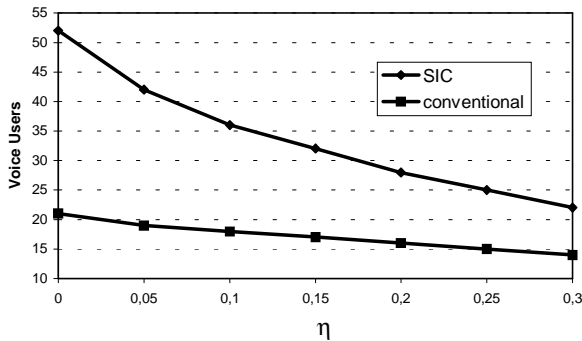


Figure 1: Cell Capacity for Conventional and SIC Systems with Voice Users only

Parameters: $W=1,23$ MHz; $R_1=9,6$ kbps; $\gamma_1: 5$

It can be observed an increase in capacity with SIC by a factor of two with respect to the conventional mode, as presented in [6], but also, that this factor decreases with η .

3- Dual Class (Voice and Data) Modelling

As proposed in [7], a particular case of multi-class and multi-rates will be analysed:

- Class 1 – voice users
 N_1 users, delay intolerants, at constant bit rate R_1 , specifying a maximum bit error rate (BER) P_{b1} , in terms of γ_1
- Class 2 – data users
 N_2 users, delay tolerants, at minimum data rate r_2 , specifying a maximum bit error rate (BER) P_{b2} , in terms of γ_2 .

3.1- Conventional Scheme

From [3] and [8], analogous to the obtained in (2), results:

$$\frac{\frac{N_1}{W}}{\frac{R_1 \gamma_1}{W} + 1} + \frac{\frac{N_2}{W}}{\frac{R_2 \gamma_2}{W} + 1} \leq \frac{1}{1+f} \left\{ 1 - \eta_0 W / \left[p_2 \left(\frac{W}{R_2 \gamma_2} + 1 \right) \min \{ h_{2,i} \} \right] \right\} \quad (12)$$

where $R_2 \geq r_2$ is the data rate which can be maximised, p_2 is a maximum data user transmission power, Class 2 is assumed to be the more restrictive, $h_{2,i}$ is a Class 2 user path loss and the system is multi-cell and homogeneous with perfect power control and unity voice activity.

The most distant user from the cell-site sets a limit on the maximum value of R_2 , because it transmits at maximum transmission power, p_2 . In this case (12) becomes an equality.

Note also that a multi-rate perfect power control imposes:

$$h_2 P_2 = h_1 P_1 \left(\frac{W}{R_1 \gamma_1} + 1 \right) / \left(\frac{W}{R_2 \gamma_2} + 1 \right) \quad (13)$$

The capacity expression can be written also as:

$$(N_1 - 1) \gamma_1 + N_2 \gamma_2 + \left(\gamma_1 \frac{N_1}{\pi R^2} + \gamma_2 \frac{N_2}{\pi R^2} \right) \sum_{\text{other cells}} \int_0^R r^5 g(r, d) dr \leq 1 - \eta \quad (14)$$

for the MAI worst case, which corresponds to a voice user, in the conventional mode.

Similarly to the single class case, we have:

$$\frac{\eta_0 W}{p_2 \min\{h_{2,i}\}} = \frac{\eta}{\gamma'_{2,\text{conv}}} \quad (15)$$

Figure 2 shows, for conventional detection, the maximum numbers of data users supported in a multi-cell and dual-class case, depending on power limits given that the data rates were fixed at its minimum value.

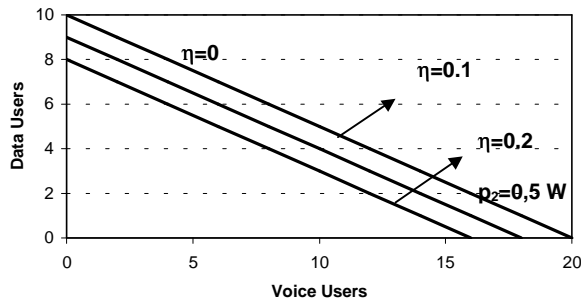


Figure 2: Cell Capacity for a Conventional System with Voice and Data Users versus p_2

Parameters: $W=1,23$ MHz; $R_1=9,6$ kbps; $\gamma_1=5$; $R_2=14.4$ kbps; $\gamma_2=7$; $h_{\min}=0,1$; $\eta_0=10^{-7}$ W/Hz.

This figure shows that dual-class conventional system capacity varies, depending on factor η , which is equivalent to a maximum power limit of the more restrictive class (given thermal noise and path loss parameters), as we can see in (15).

3.2- Scheduling Scheme

Proposed in [7], this transmission scheme allows a MAI reduction using the delay tolerance characteristic of data users, restricting only a limited number $k_2 < N_2$ of data users to transmit information at any given instant; the others will be communicating with the base station for synchronisation purposes only, at a low synchronisation rate, or “idle” rate, R_0 .

As detailed in the reference, there are conditions for a scheduling gain greater than unity, generated by MAI reduction, to overcome the negative effect of transmission “duty cycles” that appear (k_2/N_2). The scheduling gains also decrease with k_2 and R_0 and increase with the N_2 population. Classes 1 and 2 mean powers needed for the scheduling scheme are the same as those for the conventional mode, but instantaneous Class 2 power used should be N_2/k_2 times greater with the scheduling scheme.

The extended capacity expression, using [8] again, is given by:

$$\frac{N_1}{\frac{W}{R_1 \gamma_1} + 1} + \frac{k_2}{\frac{W}{R_2^* \gamma_2} + 1} + \frac{N_2 - k_2}{\frac{W}{R_0 \gamma_2} + 1} \leq \frac{1}{1+f} \left\{ 1 - \eta_0 W / \left[p_2 \left(\frac{W}{R_2^* \gamma_2} + 1 \right) \min\{h_{2,i}\} \right] \right\} \quad (16)$$

where R_2^* is the data rate in scheduling mode.

In the maximum throughput solution, also in this case, it is assumed that the most distant data user (given a known configuration) is transmitting at its maximum allowed transmission power.

Figure 3 presents scheduling throughput gains for some configurations, calculated as ratios of maximum data rates per user obtained with scheduling (effective for only a fraction k_2/N_2 of time per user) and maximum data rates per user with conventional mode, supposing it is possible to maximise data rates also in this mode.

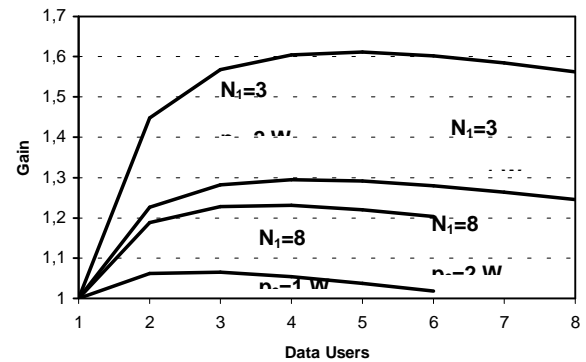


Figure 3: Scheduling Gain versus p_2 , Data and Voice Users

Parameters: $W=1,23$ MHz; $R_1=9,6$ kbps; $\gamma_1=5$; $\gamma_2=7$; $h_{\min}=0,1$; $\eta_0=10^{-7}$ W/Hz, $R_0=1.2$ kbps; $k_2=1$.

Rate maximisation (and so, capacity) is more limited in conventional mode than in scheduling by the presence of MAI. Variable scheduling throughput gains are exhibited because concerning power limits, scheduling requires greater instantaneous powers, being very sensitive to power limitations.

3.3- SIC Scheme

Assuming data users homogeneously distributed over the cell, but with received power levels in the cell-site greater than those from voice users (due to their rate and QoS requirements that are greater) it can be concluded that the N_2 data

users will be detected first, and the ordered powers are [6]:

$$h_i P_i = \gamma'_2 (\gamma'_2 + 1)^{N_2 - i} (\gamma'_1 + 1)^{N_1} P_{0, \text{total}} \quad (17)$$

for data users;

$$h_i P_i = \gamma'_1 (\gamma'_1 + 1)^{N_2 - i} P_{0, \text{total}} \quad (18)$$

for voice users.

With uniformly distributed data and voice users, and using expressions (17) and (18), the multi-cell capacity expression is given by:

$$\sum_{\text{other cells}} \int_0^R \frac{\gamma'_2 (\gamma'_1 + 1)^{N_1} r^5 N_2}{\pi R^2} g(r, d) \left[\gamma'_2 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + 1 \right]^{N_2 - 1} dr +$$

$$\sum_{\text{other cells}} \int_0^R \frac{\gamma'_1 r^5 N_1}{\pi R^2} g(r, d) \left[\gamma'_1 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + 1 \right]^{N_1 - 1} dr \leq$$

$$1 - \left\{ (\gamma'_2 + 1)^{N_2 - 1} (\gamma'_1 + 1)^{N_1} \right\} \eta \quad (19)$$

where P_{MAI} was calculated for the nearest user to the cell-site, which is the worst case for SIC.

3.4- Dual Class Numerical Results

Using (14), (15), (16) and (19), maximum data rate values were determined for some configurations for the three schemes, as presented in figures 4 and 5. Figure 4 compares throughput maximisation gains given by SIC and scheduling for a particular data-class only system. Figure 5 extends these results for dual-class case and two different configurations.

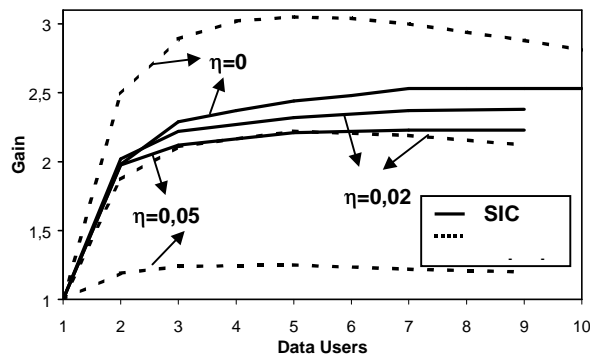


Figure 4: Scheduling and SIC Gains for Data Users only versus η

Parameters: $W=1,23$ MHz; $R_1= 9,6$ kbps; $\gamma_1=5$; $\gamma_2=7$; $R_0=1.2$ kbps; $k_2=1$; $N_1=0$.

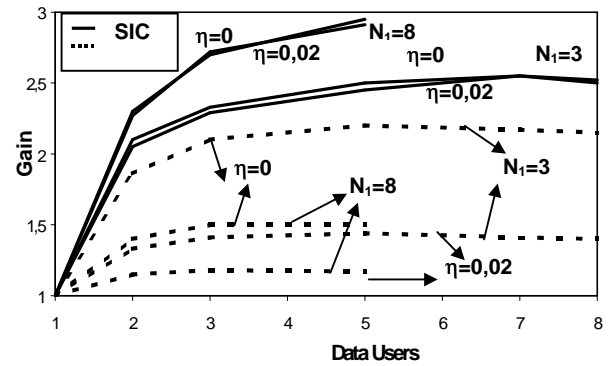


Figure 5: Scheduling and SIC Gains for Voice (N_1 users) and Data Users versus η

Parameters: $W=1,23$ MHz; $R_1= 9,6$ kbps; $\gamma_1=5$; $\gamma_2=7$; $R_0=1.2$ kbps; $k_2=1$.

4- Conclusions

The schemes considered in this work can offer substantial throughput gains. The SIC scheme is more stable as a function of η , maintaining gain values around two when calculated for the worst case (nearest user). Scheduling requires higher peak power levels due to its power control and instantaneous power needs and its gains are very dependent on maximum power limits. So we can establish that:

- SIC is better for greater voice user populations or smaller data populations in the cell and also with restricted power levels;
- Scheduling is better when it is possible to use higher peak power levels and for mainly data populated systems.

Depending on power levels it is possible to consider a scheduling transmission scheme combined with SIC detection in the same system specially for $k_2 > 1$. In this case additional gains should be expected.

References

- [1] D. N. Knisely, S. Kumar, S. Laha, S. Nanda. *Evolution of Wireless Data Services: IS-95 to cdma2000*. IEEE Communications Magazine, October-1998, pp. 140-149.
- [2] J. Rapeli. *UMTS: Targets, System Concept, and Standardization in a Global Framework*. IEEE Personal Communications, February-1995, pp. 20-28.
- [3] A. Sampath, P. S. Kumar, J. M. Holtzman. *Power Control and Resource Management for Multimedia CDMA Wireless System*. PIMRC'95, September-1995.

- [4] A. Duel-Hallen, J. Holtzman, Z. Zvonar. *Multiuser Detection for CDMA Systems*. IEEE Personal Communications, April 1995, pp. 46-58.
- [5] P. Patel, J. Holtzman. *Analysis of a Simple Successive Interference Cancellation Scheme in a DS/CDMA System*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 12, no. 5, June-1994, pp. 796-807.
- [6] D. Warrier, U. Madhow. *On the Capacity of Cellular CDMA with Controlled Power Disparities*. Proc. 1998 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'98). Ottawa, CA, May-1998.
- [7] S. Ramakrishna, J. M. Holtzman. *A Scheme for Throughput Maximization in a Dual-Class CDMA System*, IEEE Journal of Selected Areas in Communications, vol. 16, no. 6, August-1998, pp. 830-844.
- [8] K. I. Kim. *CDMA Cellular Engineering Issues*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 42, no. 3, August-1993, pp. 345-350.
- [9] A. J. Viterbi. *CDMA: Principles of Spread Spectrum Communications*. Addison-Wesley Publishing Company. 1995.